

Томский политехнический университет  
Инженерная школа ядерных технологий  
Отделение ядерно-топливного цикла

В.И. Беспалов

**«Компьютерная лаборатория»**  
**(КЛ/PCLab)**

Описание программы  
Руководство по работе с программой  
*( Версия 9.10 )*

Томск 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
<b>1. Основные характеристики пакета программ ЕРНСА .....</b>	<b>3</b>
Список литературы .....	5
<b>2. Режимы работы программы КЛ .....</b>	<b>6</b>
2.1. Режим ДЕМОНСТРАЦИЯ (DEMO) .....	6
2.2. Режим АЛЬБЕДО (ALBEDO) .....	9
2.3. Режим ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ (BF) .....	11
2.4. Режим РАСЧЕТ КОНСТАНТ (CONST) .....	11
2.5. Режим РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ (PROTECT) .....	12
2.6. Режим БАРЬЕР (BARRIER) .....	12
2.7. Режим ФАНТОМ (PHANTOM) .....	13
2.8. Режим ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (BREMSSTRAHLUNG) .....	13
2.9. Режим ПОТОК (FLUX) .....	14
2.10. UTILITY .....	14
<b>3. Работа в программе КЛ .....</b>	<b>14</b>
3.1. <a href="#">Режим ДЕМОНСТРАЦИЯ (DEMO)</a> .....	14
3.2. <a href="#">Режим АЛЬБЕДО (ALBEDO)</a> .....	16
3.3. <a href="#">Режим ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ (BF)</a> .....	20
3.4. <a href="#">Режим РАСЧЕТ КОНСТАНТ (CONST)</a> .....	22
Список литературы .....	27
3.5. <a href="#">Режим РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ (PROTECTION)</a> .....	28
3.5.1. Расчет защиты от тормозного излучения (ТИ) .....	28
3.5.2. Расчет защиты от рентгеновского излучения (РИ) .....	32
3.5.3. Расчет функции ослабления цилиндрического источника .....	36
Список литературы .....	37
3.6. <a href="#">Режим БАРЬЕР (BARRIER)</a> .....	38
3.6.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются .....	38
3.6.2. Порядок работы в режиме BARRIER .....	40
3.6.3. Структура файлов данных в режиме BARRIER .....	41
3.6.4. Структура данных для источников .....	49
IST – моноэнергетический источник .....	49
IST1 – квазимоноэнергетический источник .....	51
IST3 – сплошной спектр (функция) .....	51
IST3G – сплошной спектр (гистограмма) .....	53
IST_RAD – радионуклидный источник .....	56
IST_XRBR – источник рентгеновского (РИ) и тормозного (ТИ) излучения .....	59
IST_ISOCYL – источник равномерный и изотропный на поверхности цилиндра .....	61
Список литературы .....	62
3.7. <a href="#">Режим ФАНТОМ (PHANTOM)</a> .....	62
3.7.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются .....	62
3.7.2. Порядок работы в режиме PHANTOM .....	63
3.7.3. Структура файлов данных в режиме PHANTOM .....	66
3.7.4. Структура данных в окне результатов режима PHANTOM .....	97
3.8. <a href="#">Режим ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (BREMSSTRAHLUNG)</a> .....	100
3.8.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются .....	100
3.8.2. Порядок работы в режиме BREMSSTRAHLUNG .....	101
3.8.3. Структура файлов данных в режиме BREMSSTRAHLUNG .....	104
Список литературы .....	110
3.9. <a href="#">Режим ПОТОК (FLUX)</a> .....	111
3.9.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются .....	111
3.9.2. Порядок работы в режиме FLUX .....	112
3.9.3. Структура файлов данных в режиме FLUX .....	114
Список литературы .....	128

## Введение

Программа «Компьютерная лаборатория» (КЛ / PCLab) [1–3] предназначена для моделирования методом Монте-Карло процессов распространения электронов, позитронов, фотонов и протонов в веществе, визуализации этих процессов распространения на экране дисплея и получения численных результатов взаимодействия (например, альbedo, коэффициентов пропускания частиц, энергетических и угловых распределений частиц, распределений поглощенной энергии в веществе, дозы за защитой и т. д.).

Программу КЛ можно использовать в учебном процессе для проведения лабораторных работ по дисциплинам: «Взаимодействие излучения с веществом», «Защита от ионизирующих излучений», «Теория переноса ионизирующих излучений». КЛ позволяет проводить моделирование для различных характеристик источника, поглотителя и детектора. Основные задачи, которые при этом можно решить с помощью КЛ, следующие:

- показать наглядно физические процессы, которые происходят при попадании ионизирующего излучения в вещество;
- дополнить реальный физический эксперимент (например, лабораторную работу) более разнообразными начальными данными источника, поглотителя и детектора, чтобы в результате исследований получить не просто число, а физическую закономерность;
- предоставить возможность проведения численных экспериментов для ряда задач, когда реальный физический эксперимент невозможен из-за отсутствия необходимого лабораторного оборудования.

Программа КЛ создана на основе пакета программ ЕРНСА [3]. Ниже приведены его основные характеристики.

### 1. Основные характеристики пакета программ ЕРНСА

Пакет программ ЕРНСА (электронно-фотонный каскад) предназначен для расчетов пространственных, энергетических и угловых распределений электронов, фотонов, позитронов и протонов в однородных и неоднородных веществах. Траектории электронов и позитронов можно моделировать в интервале энергий  $10^{-2} - 10^5$  МэВ, фотонов –  $10^{-3} - 10^5$  МэВ, диапазон энергий для протонов –  $10^{-2} - 10^3$  МэВ. В программах учитываются следующие типы взаимодействий частиц:

- упругие, ионизационные столкновения, тормозное излучение – для электронов и позитронов (эффект аннигиляции для позитронов);
- эффект Комптона, фотоэффект, эффект образования электронно-позитронных пар – для фотонов;
- перенос протонов моделируется без учета ядерных взаимодействий, разыгрываются лишь упругие и неупругие кулоновские столкновения.

В программах учитывается каскадный характер распространения излучения, что особенно важно при расчете характеристик вторичного излучения.

Построение траекторий фотонов проводится в модели индивидуальных столкновений. В качестве полных сечений их взаимодействия с веществом для энергий менее 100 МэВ используются данные работы [4]. Построение траекторий электронов, позитронов и протонов проводится в модели группировки малых передач энергии с учетом флуктуаций потерь энергии в далеких столкновениях и флуктуаций продольных и поперечных смещений в результате многократного рассеяния [5]. Для моделирования углового отклонения электронов и позитронов в конце отрезка траектории используются три распределения:

- распределение Гоудсмита–Саундерсона – в диапазоне энергий менее 50 МэВ, которое предварительно рассчитывается и табулируется для некоторого количества энергий и отрезков пути определенной длины ( $s$ );
- распределение Мольера – для отрезков пути меньше  $s/2$  при энергии менее 50 МэВ и для любых отрезков – при энергии более 50 МэВ;
- «распределение Кейла» [6] – для отрезков пути, на которых число столкновений менее 20 и распределение Мольера применять нельзя. Использование этого распределения избавляет от необходимости переходить к модели индивидуальных столкновений для очень тонких слоев вещества.

Угловое распределение протонов в конце отрезка траектории разыгрывается из распределения Мольера.

Моделирование энергетического распределения фотонов тормозного излучения и расчет потерь энергии на тормозное излучение проводятся в соответствии с формулами Бете-Гайтлера, которые систематизированы в работе [7]. В области энергий (0,025–30) МэВ они стыкуются с более точными результатами Пратта в соответствии с аппроксимационным выражением из [8]. Направление движения рождающихся фотонов разыгрывается из распределения Шиффа. Отличие процессов генерации тормозного излучения электронами и позитронами учитывается в соответствии с данными работы [9].

Процесс генерации характеристического излучения учитывается в программах для К и L оболочек атомов, как в результате фотопоглощения, так и в результате ионизации атома заряженными частицами.

Пакет программ ЕРНСА состоит из нескольких программ, каждая из которых предназначена для решения определенных задач: расчета характеристик излучения в барьерной геометрии, расчета полей тормозного и рентгеновского излучения, расчета показаний детекторов и радиационных полей излучающих установок и т. д. Часть программ позволяет проводить вычисления с учетом внешнего электрического и магнитного полей.

Результаты расчетов по всем программам постоянно подвергаются тестовым сравнениям и хорошо согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными, а также с результатами расчетов по известным программам ETRAN и EGS4, GEANT4.

Перечислим некоторые задачи, которые решались при помощи пакета программ ЕРНСА:

- расчеты спектрально-углового распределения тормозного излучения электронных ускорителей и рентгеновских трубок. На основе результатов этих

расчетов были разработаны новые номограммы для расчета защиты от рентгеновского и тормозного излучения [2, 10–14];

- расчеты пространственного, энергетического и углового распределения излучения в барьерной геометрии [15–18];
- расчеты характеристик поля излучения внутри объектов, расчеты дозных полей излучающих установок [19–27];
- моделирование радиационного воздействия электронов радиационных поясов Земли на электронные компоненты космических аппаратов [28].

### **Список литературы**

1. Беспалов В.И. **Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом** учеб. пособие. 5-е изд., дополненное – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 427 с.
2. Беспалов В.И. **Лекции по радиационной защите:** учебное пособие. 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 695 с.
3. Беспалов В.И. **Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц** // Изв. вузов Физика, Приложение. – 2000. – № 4. – С. 159–165.
4. Storm E. and Israel H.I. **Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100** // Nucl. Data Tables. – 1970. – A7. – P. 565-681.
5. Кольчужкин А.М., Учайкин В.В. **Введение в теорию происхождения частиц через вещество.** – М.: Атомиздат, 1978.
6. Keil Von E., Zeitler, E. Zinn W. **Zur Einfach- und Mehrfachstreuung geladener Teilchen** // Z. Naturforschung. – 1960. – 15a. – S. 1031–1038.
7. Koch H.W., Motz J.W. **Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data** // Rev. Mod. Phys. – V. 31. – No. 4. – 1959. – P. 920–955.
8. Аккерман А.Ф., Чабдарова Н.Н. **Согласованные наборы сечений тормозного излучения для энергий электронов  $E \geq 0,025$  МэВ** // Препринт ИФВЭ 86-03. – Алма-Ата. – 1986.
9. **Тормозная способность электронов и позитронов:** Доклад 37 МКРЕ: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
10. Беспалов В.И. **Характеристики поля тормозного излучения за плоскими мишенями, облучаемыми электронами.** 1980. Деп. в ВИНТИ, № 1782-80деп.
11. Беспалов В.И. **Расчет характеристик рентгеновского излучения методом Монте-Карло.** 1980. Деп. в ВИНТИ, № 1669-80деп.
12. Беспалов В.И., Штейн М.М., Котенко Е.Н. **Номограммы для расчета защиты от прямого рентгеновского излучения** // Дефектоскопия/ – № 7. – 2000. – С. 44–55.
13. Беспалов В.И., Штейн М.М., Попова Л.А. **Номограммы для расчета защиты от рассеянного рентгеновского излучения** // Дефектоскопия. – № 8. – 2000. – С. 92–98.
14. Беспалов В.И., Колбаенкова И.И., Штейн М.М. **Номограммы для расчета защиты от прямого тормозного излучения** // Дефектоскопия. – № 1. – 2002. – С. 83–95.
15. Беспалов В.И., Чахлов В.Л., Штейн М.М. **Ослабление высоко-энергетического тормозного излучения барьерами из железа** // Дефектоскопия. – № 8. – 1987. – С. 16–24.
16. Беспалов В.И. **Факторы накопления и эффективные коэффициенты ослабления тормозного излучения для бетона** // Дефектоскопия. – № 1. – 1988. – С. 71–77.
17. Беспалов В.И., Сорокин В.Б. **Исследование дифференциальных распределений обратно рассеянных электронов:** Вопросы атомной науки и техники. Серия: общая и ядерная физика. – 1985. – Вып. 3(32) – С. 75–79.

18. Кольчужкин А.М., Беспалов В.И. **Расчет электронно-фотонных каскадов в воздухе и свинце методом Монте-Карло** // Изв. АН СССР. – 1980. – Т. 44. – № 3. – С. 572–574.
19. Беспалов В.И., Кольчужкин А.М. **Переходный эффект в ионизационном калориметре** // Изв. АН СССР, Серия Физическая. – 1981. – Т. 45. – № 7. – С. 1316–1318.
20. Беспалов В.И. и др. **Собственная нерезкость газоразрядных преобразователей, работающих с высокоэнергетическим тормозным излучением** // Дефектоскопия. – 1988. – № 1. – С. 71–77.
21. Беспалов В.И., Штейн М.М. **Поглощение энергии фотонного излучения рентгеновской пленкой** // Дефектоскопия. – 1990. – № 1. – С. 42–52.
22. Беспалов В.И., Рыжов В.В. **Неоднородность ионизации газоразрядного промежутка электронным пучком** // ЖТФ. – 1981. – Т. 51. – № 7. – С. 1403–1408.
23. Кириков А.В., Рыжов В.В., Турчановский И.Ю., Беспалов В.И. **Влияние объемного заряда электронов, многократно отраженных от анода, на ток плоского диода** // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27. – Вып. 6. – С. 13–18.
24. Беспалов В.И., Kashkovsky V.V., Chakhlov V.L. **Generation of bremsstrahlung during multiple passes of accelerated electrons through a thin target in a betatron** // NIM B. – 2003. – V. 201. – P. 292–299.
25. Беспалов В.И., Кольчужкин А.М., Кондратьева А.Г. **Доза гамма-излучения в неоднородных тканезквивалентных средах** // Медицинская физика/ – 2005 – № 4 (28). – С. 36-42.
26. Беспалов В.И., Кречетов Ю.Ф., Углов С.Р. **Возможность проведения рентгенофлуоресцентного анализа тяжелых элементов на микротроне с энергией 6 МэВ** // Известия вузов. Физика. – 2011 – Т. 54 – №. 11/2 – С. 377-381
27. Беспалов В.И., Сорокин В.Б. **Исследование методом Монте-Карло методик определения фокусного пятна тормозного излучения** // Дефектоскопия. – 2017. — № 1. – С. 75-82.
28. Беспалов В.И. и др. **Лабораторное моделирование на ускорителях вариаций спектральной плотности потока электронов радиационных поясов Земли: Неразрушающий контроль и диагностика.** Изв. ТПУ. – Томск: НТЛ, 1998. – С. 31–39.
29. Беспалов В.И. **Надзор и контроль в сфере безопасности. Радиационная защита:** учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. 4-е изд. М. : Изд. Юрайт, 2016. – 507 с.

## **2. Режимы работы программы КЛ**

Рассмотрим кратко возможные режимы работы программы КЛ (PCLab) и порядок работы в каждом из них на основе версии программы 6.4. Каждый режим работы программы имеет свой подробный файл помощи.

### ***2.1. Режим ДЕМОНСТРАЦИЯ (DEMO)***

Демонстрация процессов распространения различных типов частиц в веществе. Работа в этом режиме осуществляется через меню DEMO (DEMO ⇒ Start DEMO).

В режиме DEMO программа КЛ проводит моделирование процессов распространения электронов, позитронов, фотонов и протонов в различных однородных веществах с их визуализацией на экране дисплея. На экран выводятся

также следующие численные результаты взаимодействия излучения с веществом: коэффициенты отражения и пропускания частиц, доза за защитой и для отраженного излучения (только от фотонов). В этом режиме работы можно выводить на экран каждую траекторию отдельно и моделировать ее в замедленном режиме. Это позволяет наглядно показать рождение и распространение вторичных частиц.

На рис. 1.1 изображено окно программы КЛ при моделировании распространения в воздухе мононаправленного пучка электронов с начальной энергией 1 МэВ. Слева в нижнем окне содержится информация о коэффициентах пропускания, альбедо, дозе за барьером вместе со статистической погрешностью расчета, которая изменяется с числом построенных траекторий.

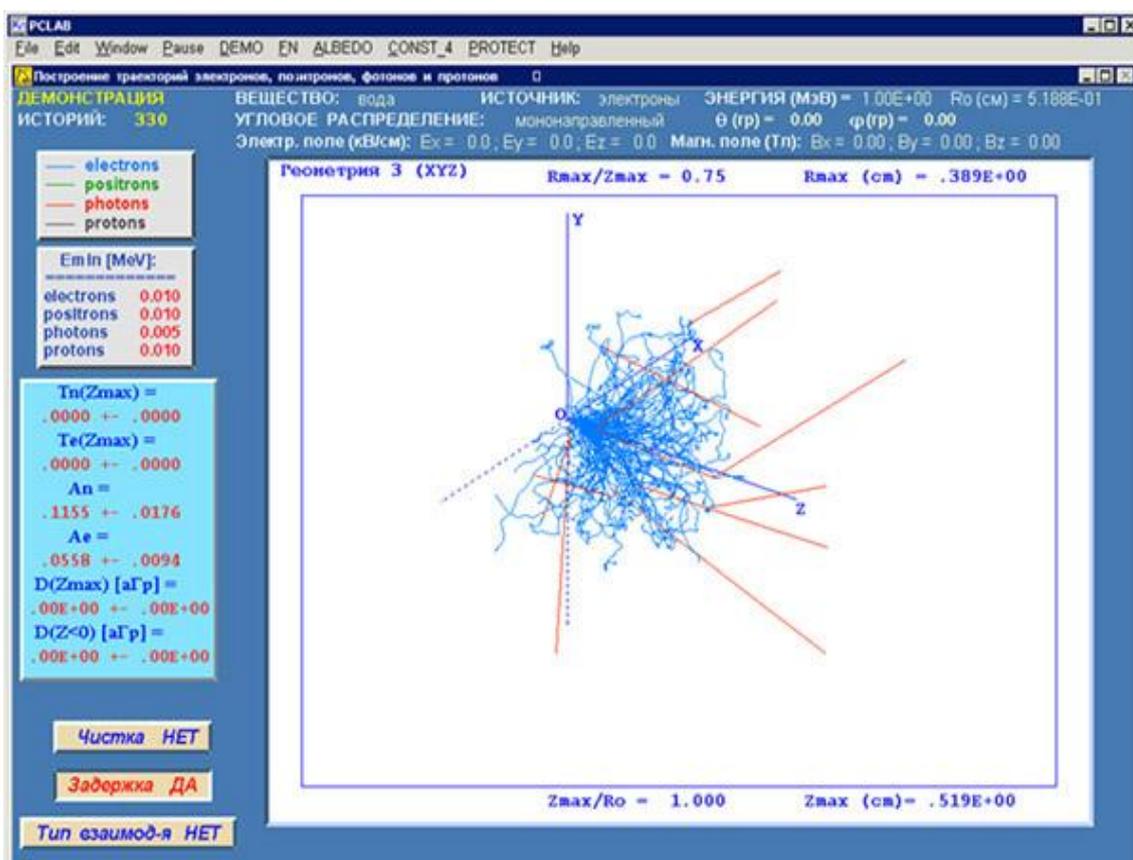
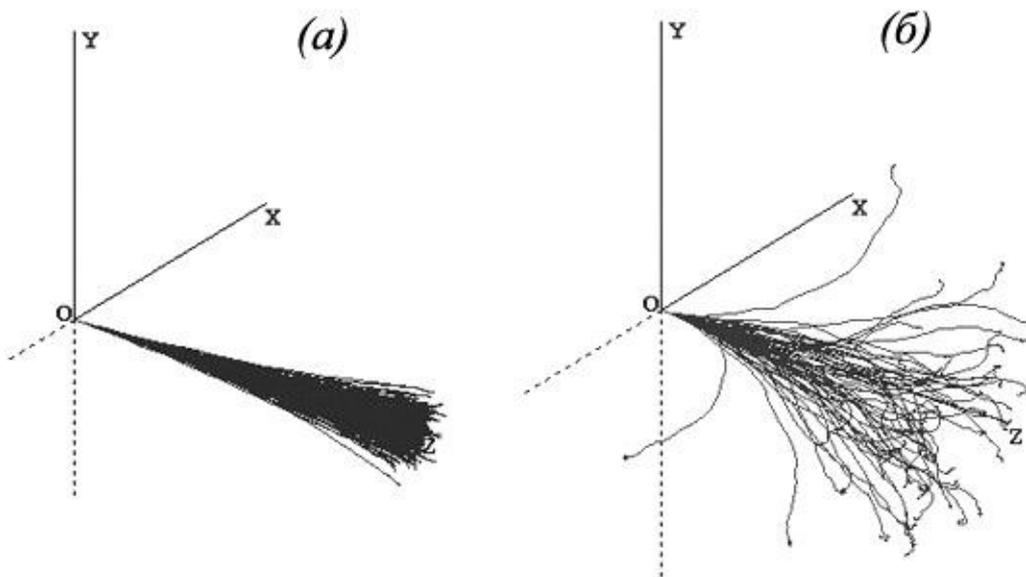


Рис. 2.1. Траектории электронов и вторичных фотонов в воздухе.  $T_0 = 1$  МэВ

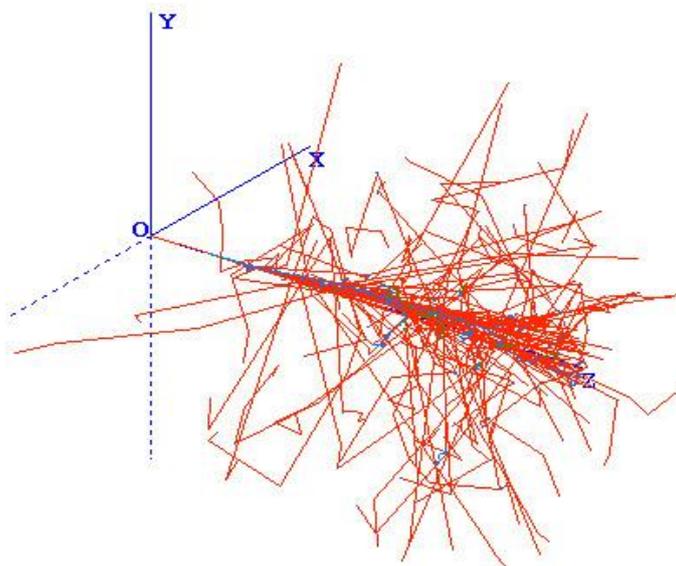
На рис. 2.2 приведены траектории мононаправленного пучка протонов в воздухе и в свинце. При сравнении рисунков 2.1 и 2.2 хорошо видно различие в многократном рассеянии легких и тяжелых заряженных частиц при их движении в веществе, а также влияние атомного номера среды на рассеяние частиц.



**Рис. 2.2.** Траектории протонов с  $T_0 = 1$  МэВ в воздухе – (а) и в свинце – (б)

Если нажата кнопка «Тип взаимодействия», то траектории частиц строятся в замедленном режиме, и при каждом взаимодействии частицы в специальном окне появляется информация о типе взаимодействия и энергии вторичных частиц.

На рис. 2.3 изображен одиночный электронно-фотонный каскад в меди, образованный фотоном с начальной энергией 1000 МэВ.



**Рис. 2.3.** Электронно-фотонный каскад в меди от фотона с энергией 1000 МэВ

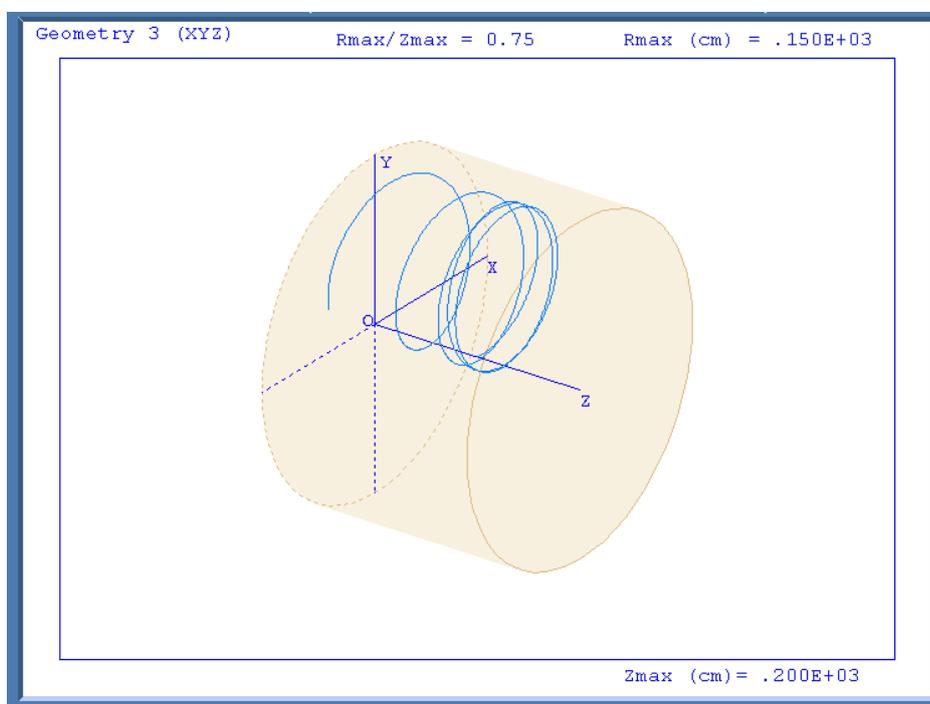
На рис. 2.4 показано начало пути протонного пучка с энергией 100 МэВ в воде. Хорошо видно, что дельта-электроны, образующиеся в ионизационных столкновениях, имеют небольшую энергию и поглощаются вблизи траекторий

первичных протонов. Это приводит к заметному увеличению удельной (на единицу объема) поглощенной энергии вблизи трека тяжелой первичной частицы.



**Рис. 2.4.** Траектории первичных протонов ( $T_0 = 100$  МэВ) и вторичных электронов в воде

В режиме DEMO программы КЛ имеется возможность выполнить моделирование траекторий частиц в вакууме и воздухе при наличии внешнего однородного электрического и (или) магнитного поля (рис. 2.5).



**Рис. 2.5.** Траектория электрона с энергией 40 кэВ в вакууме при наличии однородного электрического и магнитного поля

## 2.2. Режим АЛЬБЕДО (ALBEDO)

Расчет методом Монте-Карло интегральных и дифференциальных характеристик альbedo электронов, фотонов, позитронов, протонов для однородных и гетерогенных барьеров из различных веществ для разных энергий и углов падения первичного излучения. Результаты расчета вместе со статистической погрешностью выдаются в текстовом и графическом виде.

На рис. 2.6 изображено окно программы КЛ при расчете характеристик альbedo фотонов с энергией 1 МэВ от гетерогенного барьера Al-Pb. На экран выводятся результаты расчета интегрального токового числового альbedo. Приведена статистическая погрешность расчета.

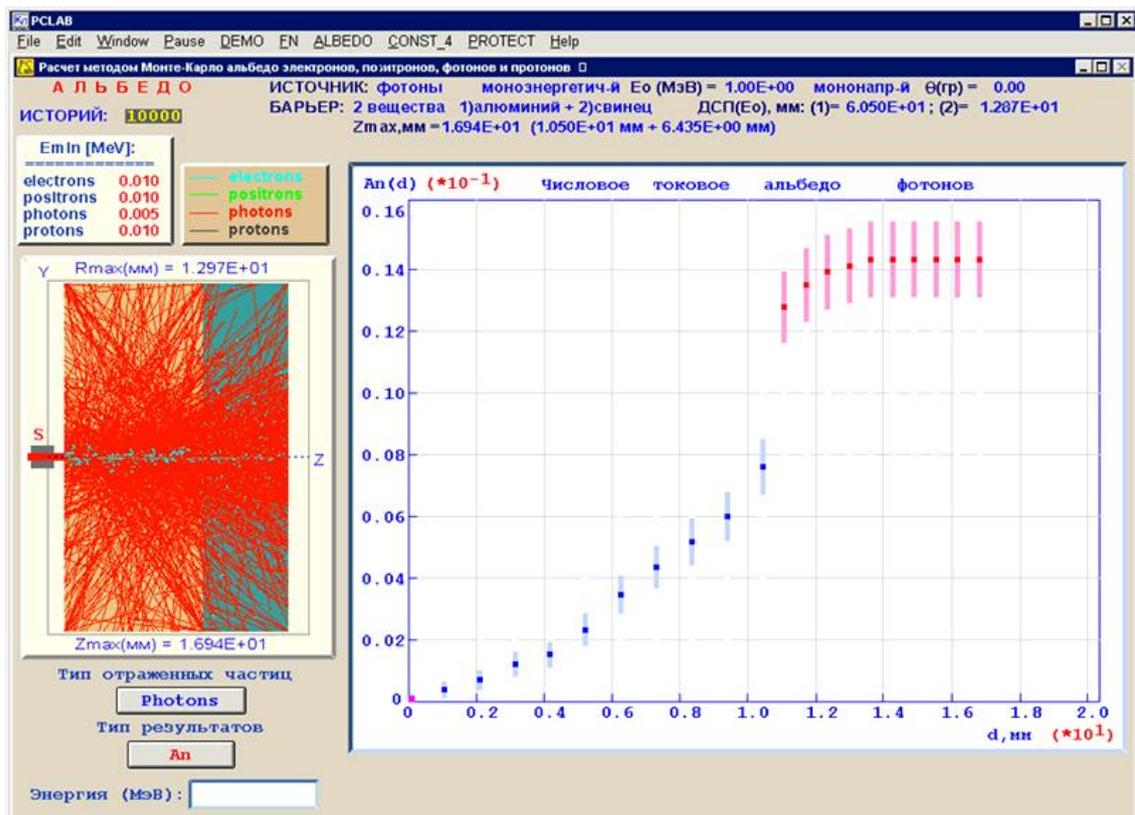


Рис. 2.6. Режим работы АЛЬБЕДО

На рис. 2.7 приведены результаты расчета методом Монте-Карло спектров фотонов, отраженных от гетерогенного барьера Al-Pb для источника рентгеновского излучения с напряжением 250 кВ.

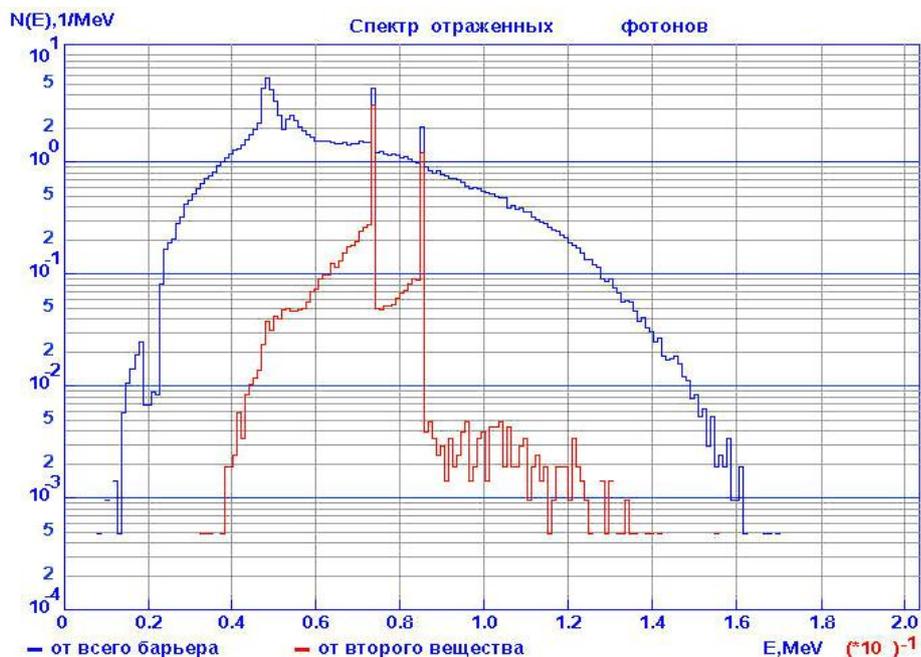


Рис. 2.7. Режим АЛЬБЕДО. Спектры отраженного рентгеновского излучения

### 2.3. Режим ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ (BF)

Расчет методом Монте-Карло зависимости факторов накопления от энергетического и углового распределения фотонов, вещества и толщины однородного или двухслойного барьера, поперечных размеров детектора.

Одновременно рассчитываются числовой, энергетический и дозовый факторы накопления. Расчеты возможны в двух геометриях: барьерной и полубесконечной. Результаты расчета вместе со статистической погрешностью выдаются в текстовом и графическом виде. На рис. 2.8 изображено окно программы КЛ при расчете факторов накопления тормозного излучения с максимальной энергией 6 МэВ в железе.

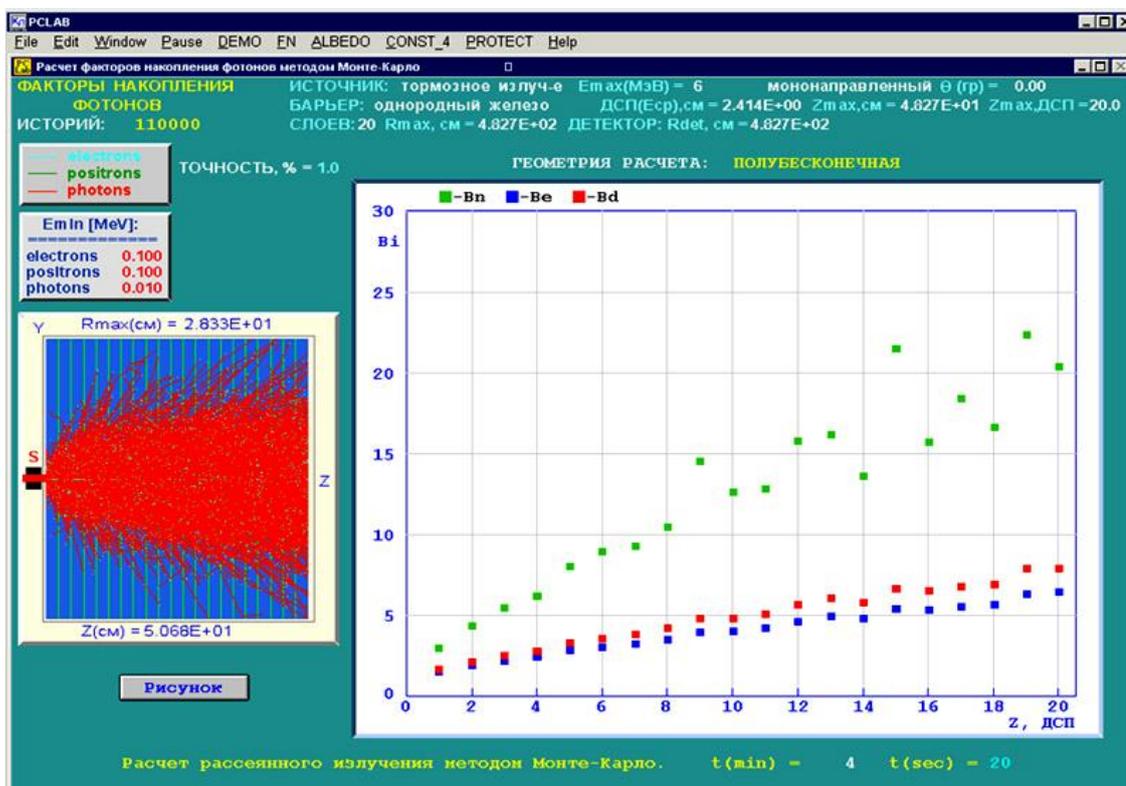


Рис. 2.8. Расчет факторов накопления тормозного излучения

### 2.4. Режим РАСЧЕТ КОНСТАНТ (CONST)

Расчет сечений взаимодействия и функций распределения, необходимых для моделирования траекторий электронов, позитронов, фотонов, протонов и мюонов методом Монте-Карло. Расчет констант возможен для простых и сложных веществ в диапазоне энергий:  $10^{-2} - 10^6$  МэВ – для электронов и позитронов,  $10^{-2} - 10^3$  МэВ – для протонов,  $10^{-3} - 10^6$  МэВ – для фотонов,  $1 - 10^6$  МэВ – для мюонов. Кроме бинарного файла результатов, который может быть использован в самой программе КЛ, результаты расчета в виде таблиц с размерностями помещаются в текстовый файл. Режим CONST позволяет быстро рассчитать сечения взаимодействия для всех элементов с  $Z=1-100$  и любых сложных веществ, вместо того, чтобы искать их в справочниках.

## 2.5. Режим РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ (PROTECT)

В этом режиме работы программы КЛ можно выполнить расчеты толщины защиты из бетона, железа и свинца от первичного и рассеянного рентгеновского излучения для напряжений 75–450 кВ, от первичного и рассеянного тормозного излучения для энергий ускоренных электронов 0,5–50 МэВ. Расчеты выполняются по номограммам, которые получены в работах [1–4]. Можно также рассчитать мощность дозы от цилиндрического объемного источника с учетом и без учета защиты и выполнить расчет защиты от моноэнергетических точечных изотропных источников по универсальным таблицам Гусева.

## 2.6. Режим БАРЬЕР (BARRIER)

Программа КЛ выполняет расчеты методом Монте-Карло интегральных и дифференциальных характеристик электронов, позитронов, фотонов, протонов в однородной и гетерогенной барьерной геометрии. Возможен учет внешнего электрического и магнитного поля. Расчеты можно проводить для любых простых и сложных веществ (рис. 2.9), а необходимые для расчета сечения и распределения готовятся в режиме CONST.

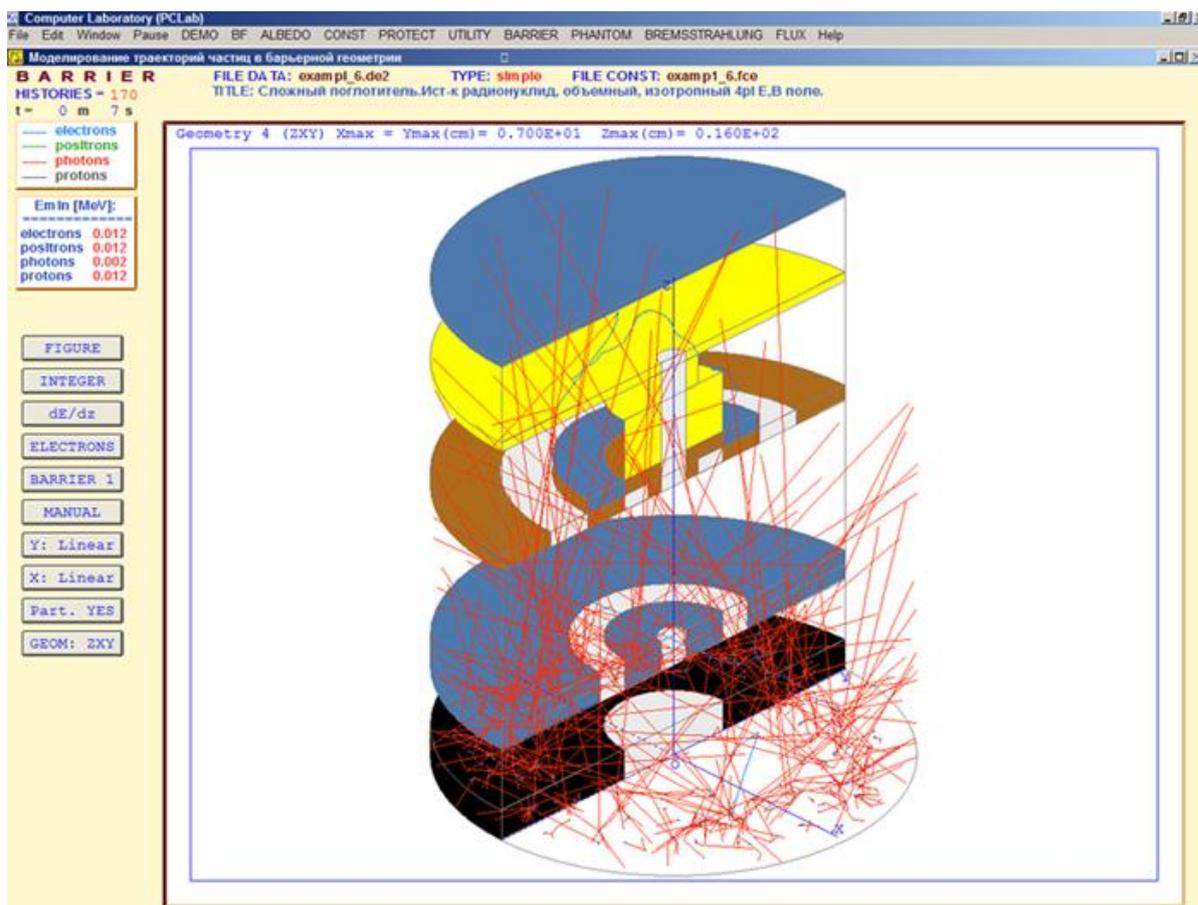


Рис. 2.9. Программа КЛ, моделирование в режиме БАРЬЕР

## 2.7. Режим ФАНТОМ (PHANTOM)

Расчет методом Монте-Карло 3-х мерного пространственного распределения поглощенной энергии в детекторе, представляющем собой прямоугольный параллелепипед, разбитый на элементарные воксели. Детектор может имитировать фантом, а геометрия, в которую он может быть помещен, может имитировать реальную геометрию дистанционной лучевой терапии на пучках фотонов, электронов и протонов. Расчеты можно проводить для любого вещества и в сложной геометрии.

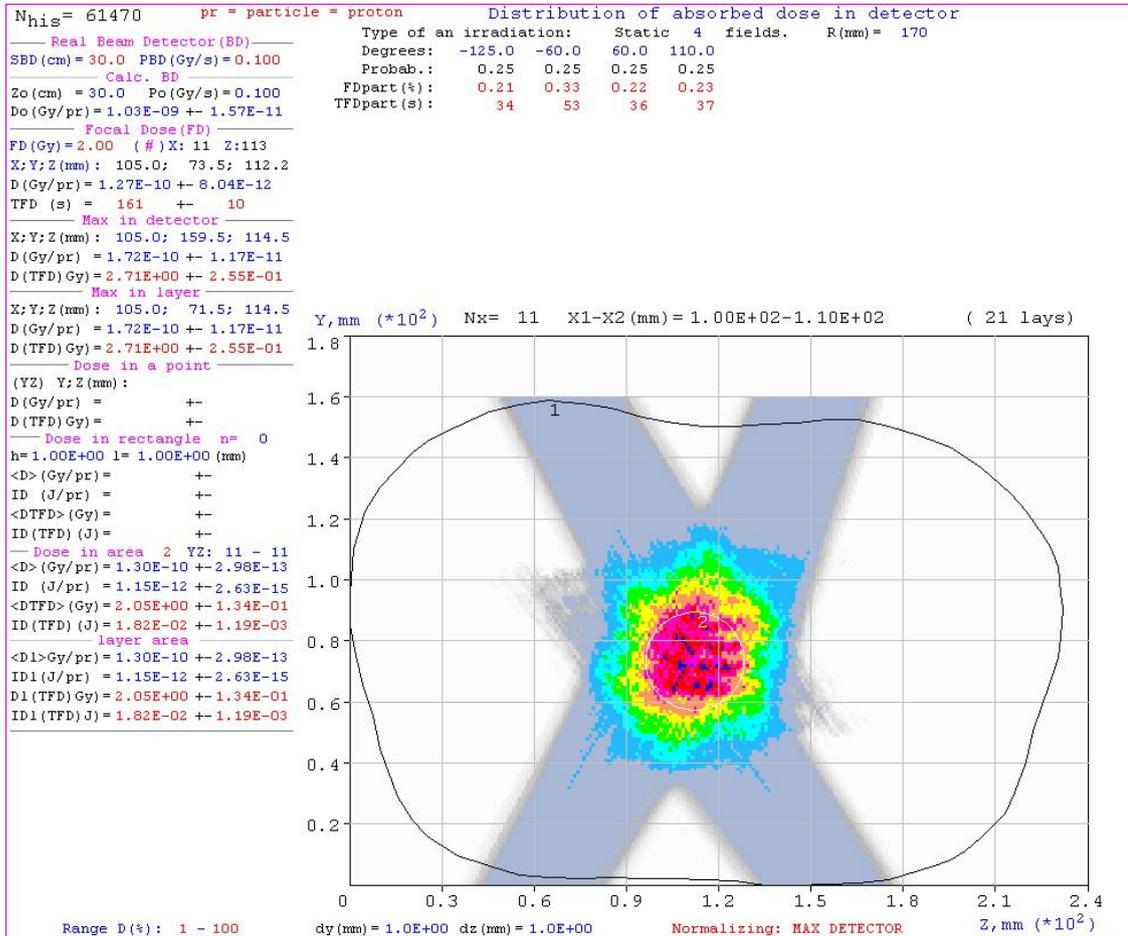


Рис. 2.10. Распределение поглощенной дозы в водном фантоме от протонного пучка с изменяемой энергией. Облучение с 4-х направлений. Программа КЛ, режим PHANTOM

## 2.8. Режим ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (BREMSSTRAHLUNG)

Расчет методом Монте-Карло интегральных характеристик и спектрально-угловых распределений тормозного излучения электронов и позитронов из плоских мишеней в барьерной геометрии. Возможен расчет с учетом внешнего электрического и магнитного поля.

## 2.9. Режим ПОТОК (FLUX)

Расчет методом Монте-Карло потоковых интегральных и дифференциальных характеристик электронов, позитронов, фотонов, протонов внутри однородного и гетерогенного поглотителя. Возможен учет внешнего электрического и магнитного поля. Геометрия в режиме FLUX задается так же, как и в режиме BARRIER (см. рис. 2.9).

Возможен расчет функции отклика детектора для двух типов детекторов: NaI(Tl) и Ge.

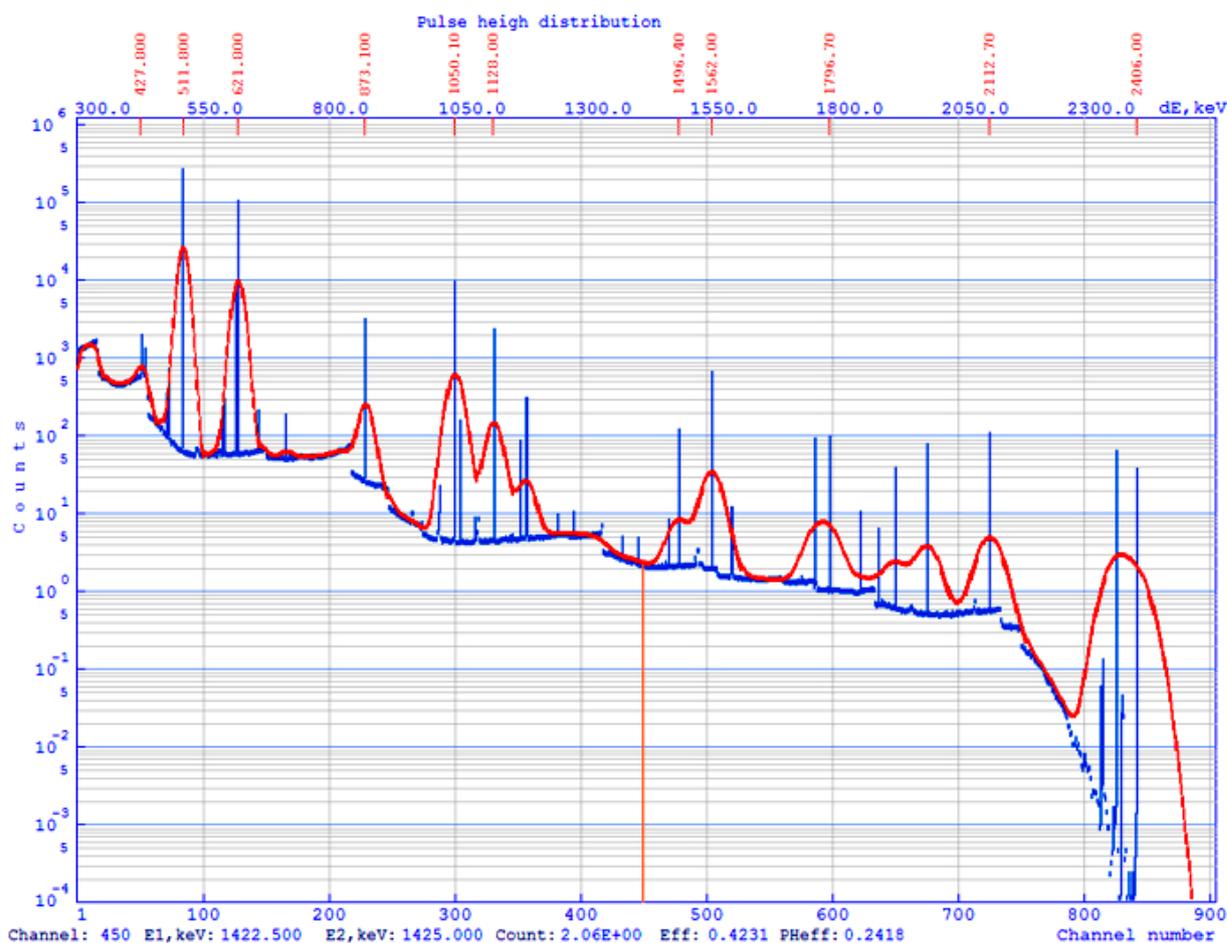


Рис. 2.11. Распределение импульсов поглощенной энергии и функция отклика детектора NaI(Tl) для гамма излучения р/н источника  $^{106}\text{Ru}$ . Режим FLUX

## 2.10. UTILITY

В меню добавлен раздел UTILITY, в который помещаются небольшие *полезные* в работе программы. В данной версии PCLab в этом разделе меню находятся следующие программы:

- Calc – калькулятор (из Windows);
- Utility\_1 – расчет интегралов от произведения спектра фотонов на сечения взаимодействия фотонов в заданном веществе;
- Histogramm – подготовка гистограмм для графического редактора;
- Spectrum – программа для работы со спектрами.

## 3. Работа в программе КЛ

### 3.1. Режим ДЕМОНСТРАЦИЯ (DEMO)

СТАРТ программы через меню DEMO ⇒ **Start DEMO**;

правильная остановка программы: DEMO ⇒ **Stop DEMO**;

выход из программы: **File** ⇒ **Exit**;

остановка работы на некоторое время: **Pause** ⇒ **Pause**;

продолжение работы: **Pause** ⇒ **Resume**.

По умолчанию программа загружает и выдает на экран вариант входных данных для построения траекторий электронов в воде. Можно оставить эти данные или ввести свои:

- 1) вещество поглотителя;
- 2) тип излучения источника;
- 3) начальную энергию источника;
- 4) тип углового распределения частиц источника;
- 5) выбрать геометрию для построения траекторий частиц.

Поглотитель представляет собой цилиндр с определенным радиусом и длиной, которые можно менять. Программа подсказывает порядок и способ ввода начальных данных.

Сразу после ввода всей информации о поглотителе и источнике начинается моделирование и траектории частиц последовательно выводятся на дисплей. Слева в трех окнах выводится следующая информация:

- (1) Цвет траектории в соответствии с типом частиц:

*электроны* – голубые,  
*позитроны* – зеленые,  
*фотоны* – красные,  
*протоны* – черные;

- (2) Минимальная энергия, до которой строятся траектории частиц;

- (3) Числовые значения некоторых функционалов, которые рассчитываются:

$T_n(Z_{\max})$  – коэффициент пропускания по числу частиц для  $Z=Z_{\max}$ ;

$T_e(Z_{\max})$  – коэффициент пропускания по энергии для  $Z=Z_{\max}$ ;

$A_n$  – числовое токовое альбедо;

$A_e$  – энергетическое токовое альбедо;

$D(Z_{\max})$  – поглощенная доза в воздухе (*только от фотонов*) за барьером на оси  $Z$ . 1 аГр (аттоГрей) =  $10^{-18}$  Гр;

$D(Z<0)$  – поглощенная доза в воздухе перед барьером (*только от фотонов, выходящих из барьера назад*).

Для всех рассчитываемых характеристик поля излучения приводится статистическая погрешность (среднеквадратичное отклонение), которая рассчитывается в процессе моделирования. Все результаты нормируются на одну первичную частицу источника.

В процессе моделирования можно менять метод построения траекторий частиц. Для этого служат кнопки «Чистка» и «Задержка», которые являются циклическими (ДА – включено, НЕТ – выключено).

«Чистка»: В режиме ДА на экране будет отображаться только одна (последняя) траектория. Чтобы построить следующую, надо нажать левую кн. мыши и т.д.

«Задержка»: В режиме ДА траектория строится постепенно, с задержкой во времени перед построением следующего отрезка.

Используя раздел меню **Edit**, любую часть экрана можно выделить, скопировать в буфер обмена и затем поместить в файл, например, word-файл. В момент выделения экрана расчет приостанавливается, а после копирования продолжается. Все это возможно сделать и после окончания расчета.

Программа позволяет, не выходя из нее, изменить начальные данные и начать новое моделирование. Это надо делать через раздел меню **Change**. Изменить можно:

**Particle** – тип первичного излучения,  
**Energy** – энергию частиц источника,  
**Substance** – вещество поглотителя,  
**Angle** – угловое распределение частиц источника,  
**Zmax** – длину поглотителя.  
**Geometry** – тип геометрии для траекторий частиц,  
**Rmax** – радиус поглотителя,  
**XYZ\_0** – начальные координаты частиц источника.

**ВНИМАНИЕ!** Изменения не работают, если включен режим «*Чистка*».

Режим работы «*Тип взаимодействия*». В этом режиме автоматически включаются «*Чистка*» и «*Задержка*» и при каждом взаимодействии частицы в специальном окне (появляется на месте окна результатов) сообщается тип этого взаимодействия и энергия вторичной частицы:

*ионизация* – дельта-электрона,  
*тормозное излучение* – фотона,  
*аннигиляция* – кванта с большей энергией,  
*фотоэффект* – фотоэлектрона,  
*комpton эффект* – комптоновского электрона,  
*образование пар* – позитрона.

Число соответствующих взаимодействий суммируется по всем построенным траекториям, и результат выводится на дисплей. Этот режим выключается после очередного нажатия клавиши «*Тип взаимодействия*».

Возможно моделирование траекторий частиц при наличии однородных электрического (E) и (или) магнитного (B) полей, если после **Start DEMO** выбрать соответствующий режим моделирования. Этот режим реализован только для двух веществ: воздуха и вакуума. Величина каждого поля (напряженность E-поля и магнитная индукция B-поля) задаются в диалоговом режиме с помощью трех проекций поля на оси координат. Эти значения можно затем менять в разделе меню **Change**: ⇒ **E\_Field (B\_Field)**. По умолчанию программа задает начальные характеристики электрического и магнитного поля. В данном режиме работают кнопки «*Чистка*» и «*Задержка*», но не работает кнопка «*Тип взаимодействия*» и не вычисляются никакие результаты моделирования.

**ПОЛЕЗНО ЗНАТЬ.** Если частица с кинетической энергией T (МэВ) движется перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, то радиус кривизны ее траектории R (см) связан с кинетической энергией и индукцией магнитного поля B (Тесла) соотношением: 
$$R = \frac{\sqrt{(T^2 + 2Tmc^2)}}{3B}.$$

В пункте меню **DEMO** ⇒ **Questions** находятся вопросы для проверки знаний, а в пункте **DEMO** ⇒ **Tasks** варианты заданий для моделирования, которые можно выполнить в режиме DEMO.

При работе режима DEMO создается файл demo\_res.txt, который находится в директории ...\\PCLAB\\DEMO\\demo\_res.txt. В этот файл помещается информация о вводимых данных, результатах расчета и о ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть при моделировании.

### 3.2. Режим АЛЬБЕДО (ALBEDO)

СТАРТ программы через меню ALBEDO ⇒ **Start ALBEDO**;  
правильная остановка программы ALBEDO ⇒ **Stop ALBEDO**;  
выход из программы **File** ⇒ **Exit**;  
остановка работы на некоторое время **Pause** ⇒ **Pause**;  
продолжение работы **Pause** ⇒ **Resume**.

Все вводимые начальные данные отображаются в верхней части экрана. Определенный вариант всех начальных данных вводится по умолчанию. Если не хотите менять предлагаемые значения, то нажимайте кн. «Cancel».

1) Расчет проводится в барьерной геометрии – плоский барьер конечной толщины.

2) Расчеты возможны для 4-х типов частиц: *электроны, позитроны, фотоны, протоны*. Начальные энергии частиц от 0,05 МэВ до 1000 МэВ.

3) Для всех частиц можно задать 2-а типа энергетического распределения источника:

а) **МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ** – с энергией от 0,05 до 1000 МэВ;

б) **ЗАДАННЫЙ СПЕКТР** – задается любое энергетическое распределение частиц в виде гистограммы. Это распределение необходимо поместить в файл spectrum.dat, который должен находиться в папке \\PCLAB\\ALBEDO\\. Содержимое файла spectrum.dat должно иметь следующую форму, например,

9 – число интервалов гистограммы (max 50)

0.1,0.2,0.3,0.4,0.5, – значения энергий МэВ (9+1)

0.6,0.7,0.8,0.9,1.,2.,3.,4.,5., – значения спектра (9)

Какой-то вариант файла spectrum.dat всегда должен находиться в указанной выше папке.

4) Для фотонов дополнительно можно задать еще два типа источника:

а) **ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** – спектры фотонов за вольфрамовыми мишенями электронных ускорителей в направлении первичного пучка электронов. Максимальные энергии тормозного излучения  $E_{max} = 1, 3, 6, 10, 15, 30, 50$  и 100 МэВ (рассчитаны методом Монте-Карло);

б) **РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** – спектры тормозного излучения+ХРИ, выходящие назад из толстых вольфрамовых мишеней под углом  $45^\circ$  и для угла падения электронов  $45^\circ$ . Рассчитаны методом Монте-Карло с учетом фильтрации стеклом (0,5 мм) рентгеновской трубки. Возможен выбор спектров для рентгеновских трубок с максимальными напряжениями  $U_{max} = 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350,$  и 400 кВ.

5) Можно задать два вида углового распределения источника:

а) **МОНОНАПРАВЛЕННЫЙ** – тонкий луч с определенным направлением относительно осей OZ (нормаль к поверхности барьера) и OX;

б) ИЗОТРОПНЫЙ в направлении к поверхности барьера. Для такого источника надо задать угол раствора коллиматора.

б) Расчеты характеристик отраженного излучения можно проводить для однородных и гетерогенных (состоящих из двух веществ) барьеров. Вещество всего барьера или каждой части гетерогенного барьера выбирается из стандартного списка 25 веществ (вакуум не выбирать).

7) Можно выполнить случайный выбор вещества однородного барьера. Это необходимо при выполнении одного из заданий.

8) Толщина однородного барьера или каждой из 2-х частей гетерогенного ( $Z_{\max}$ ) задается в мм. Так как величина альбедо с увеличением толщины барьера стремится к насыщению, то НЕ ЗАДАВАЙТЕ эту толщину более длины среднего пробега первичной заряженной частицы ( $R_0$ ) или трех длин свободного пробега (ДСП) первичных фотонов. Для источников со сплошным спектром используйте  $R_0(E_{\text{ср}})$  или ДСП( $E_{\text{ср}}$ ), где  $E_{\text{ср}}$  – средняя энергия спектра.

9) Далее задается максимальная энергия отраженных частиц (по умолчанию она равна начальной энергии). Меняя эту величину можно рассчитать зависимость величины альбедо от энергии отраженных частиц.

10) Затем задается число интервалов гистограммы спектра отраженных частиц. Максимальное значение 1000. Если число интервалов менее 101, то расчет спектров ведется со статистической погрешностью и результат выводится в виде: среднее значение “+ –” среднеквадратичное отклонение. Задав большее число интервалов, можно получить очень подробную информацию о спектре отраженных частиц. Но это может потребовать большого времени расчета. ПОМНИТЕ, чем больше интервалов, тем выше погрешность при одинаковой статистике.

11) В последнюю очередь задается максимальная энергия спектров на экране дисплея. Энергия большинства отраженных частиц мала по сравнению с энергией частиц источника (особенно при нормальном падении первичных частиц на барьер). Если энергия частиц источника велика, то рассчитываемые спектры могут быть сосредоточены в низкоэнергетической области. В этом случае целесообразно уменьшить  $E_{\max}$ , чтобы получить большую информацию о спектре отраженных частиц. Изменяя  $E_{\max}$ , можно выводить на экран более подробно нужный диапазон спектра.

#### ПОСЛЕ ВВОДА ВСЕХ ДАННЫХ НАЧИНАЕТСЯ РАСЧЕТ

1) Рассчитываются следующие ИНТЕГРАЛЬНЫЕ (зависят от толщины барьера) характеристики отраженных частиц:

- полное числовое токовое альбедо ( $A_n$ );
- полное энергетическое токовое альбедо ( $A_e$ );
- полное дозовое потоковое альбедо ( $A_d$ );

При расчете интегральных характеристик весь барьер делится равномерно на 20 слоев (у гетерогенного барьера каждое вещество делится равномерно на 10 слоев) и значения альбедо выводятся для каждого слоя.

2) Рассчитываются СПЕКТРЫ отраженных частиц для заданной толщины барьера. Если барьер гетерогенный, то рассчитываются 2 спектра: а) от всего

барьера, б) спектр частиц, попавших во второе вещество барьера, отразившихся от него и вышедших из барьера.

3) На дисплее слева внизу расположены 2 кнопки:

«*Тип отраженных частиц*» – позволяет изменять тип частиц, для которых результаты расчета выводятся на экран. Если тип отраженных и первичных частиц совпадает, то это характеристики АЛЬБЕДО, а если нет – КВАЗИАЛЬБЕДО.

«*Тип результатов*» – можно менять тип результатов, которые выводятся на экран. Кнопки реагируют на нажатие левой клавиши мыши.

4) Ниже кнопок находится окно, куда выводится информация о значении энергии соответствующей области спектра (только для спектров) после нажатия левой клавиши мыши. Так, например, можно определить энергию нужной линии ХРИ.

5) Результаты расчета выводятся в правое большое окно. В левом небольшом окне отображается проекция барьера на пл. YOZ и траектории первых 1000 частиц. Цвета частиц указаны выше в маленьком окне.

б) Для остановки и последующего продолжения расчета используйте раздел меню **Pause**.

7) Используя раздел меню **Edit** любую часть экрана можно выделить, скопировать в буфер и затем поместить в файл, например, Word-файл. В момент выделения экрана расчет приостанавливается, а после копирования в буфер продолжается. Это можно делать и после окончания расчета.

8) В процессе расчета через меню **Change** можно, не выходя из программы, изменить:

а) БЕЗ ОКОНЧАНИЯ ВЫПОЛНЯЕМОГО РАСЧЕТА

**Image Spectrum** – способ вывода спектров на экран (точки или линии). Но это работает только когда число интервалов гистограммы спектра велико (более нескольких сот);

**E<sub>max</sub> Spectrum** – максимальную энергию спектров, выводимых на дисплей;

**Scale Y Spectrum** – тип шкалы Y для спектров: линейная или логарифмическая.

б) С ОКОНЧАНИЕМ ВЫПОЛНЯЕМОГО РАСЧЕТА

**Particle** – тип первичных частиц. НЕЛЬЗЯ изменить тип частиц для источников рентгеновского и тормозного излучения;

**Energy** – энергию первичных частиц;

**Angle** – угловое распределение первичных частиц;

**E<sub>max</sub> reflected Particles** – максимальную энергию отраженных частиц;

**Z<sub>max</sub> Target** – толщину мишени.

Если рассчитанные ранее результаты нужны, то сохраните их. Программа предложит это сделать (выберите Yes). Результаты будут помещены в файл alb\_res.txt в папке ...\PCLAB\ALBEDO\.

9) Чтобы сохранить полученные результаты заканчивайте расчет через раздел меню **Stop ALBEDO**. Результаты расчета помещаются в конец файла alb\_res.txt. Все результаты можно просмотреть в графическом виде, нажимая кнопки «*Тип отраженных частиц*» и «*Тип результатов*».

10) После этого можно запустить любое новое моделирование, доступное

в PCLAB. Если необходимо снова запустить режим ALBEDO, то выходите из этого режима с чисткой окна.

11) Для полного выхода из КЛ используйте меню **File** ⇒ **Exit**.

12) В режиме ALBEDO имеются вопросы для проверки знаний раздел меню **Questions** и варианты заданий – **Tasks**. Каждое задание можно рассматривать как проведение физического эксперимента на компьютере (численное моделирование). Меню **Table XRAYS** содержит для 100 элементов таблицу значений энергий К-уровней, средних энергий ХРИ К-альфа и К-бета переходов и средних энергий ХРИ по всем L переходам.

При работе программы АЛБЕДО создается файл alb\_res.txt, который находится в папке ...\\PCLAB\\ALBEDO\\. В этот файл помещается информация о вводимых данных и о ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть при моделировании. В конце расчета туда помещаются результаты моделирования.

### 3.3. Режим ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ (BF)

СТАРТ программы через меню **BF** ⇒ **Start BF**;

правильная остановка программы **BF** ⇒ **Stop BF**;

выход из программы **File** ⇒ **Exit**;

остановка работы на некоторое время **Pause** ⇒ **Pause**;

продолжение работы **Pause** ⇒ **Resume**.

1) Расчет ФН ведется в двух геометриях:

*барьерной* – слой защиты конечной толщины. Источник и детектор вне защиты;  
*полубесконечной* – источник вне защиты, детекторы в защите.

2) Расчеты возможны для источников фотонов 4-х типов:

а) МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ – источник фотонов с энергией от 0,05 до 100 МэВ;

б) ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – спектры фотонов за вольфрамовыми мишенями электронных ускорителей в направлении первичного пучка электронов. Максимальные энергии тормозного излучения  $E_{max} = 1, 3, 6, 10, 15, 30, 50$  и 100 МэВ (рассчитаны методом Монте-Карло);

в) РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – спектры тормозного излучения + ХРИ, выходящие назад из толстых вольфрамовых мишеней под углом  $45^\circ$  и для угла падения электронов  $45^\circ$ . Рассчитаны методом Монте-Карло с учетом фильтрации стеклом (0,5 мм) рентгеновской трубки. Возможен выбор спектров для рентгеновских трубок с максимальными напряжениями  $U_{max} = 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350,$  и 400 кВ.

г) ЗАДАННЫЙ СПЕКТР – задается любое энергетическое распределение фотонов в виде гистограммы. Это распределение необходимо поместить в файл spectrum.dat, который должен находиться в папке ...\\PCLAB\\BF\\. Содержимое файла spectrum.dat должно иметь следующую форму, например:

9 – число интервалов гистограммы (max 50)

0.1,0.2,0.3,0.4,0.5, – значения энергий МэВ (9+1)

0.6,0.7,0.8,0.9,1.,2.,3.,4.,5., – значения спектра (9)

*Вариант файла spectrum.dat всегда должен находиться в указанной выше папке.*

3) Можно задать два вида углового распределения источника:

а) **МОНОНАПРАВЛЕННЫЙ** – тонкий луч с определенным направлением относительно осей OZ (нормаль к поверхности защиты) и OX;

б) **ИЗОТРОПНЫЙ** в направлении к поверхности защиты. Для такого источника надо задать угол раствора коллиматора.

4) Расчеты ФН можно проводить для однородных и гетерогенных (состоящих из двух веществ) защит. Вещество однородной защиты и каждой части гетерогенной выбирается из стандартного списка 25 веществ (вакуум не выбирать).

5) Толщина однородной защиты или каждой из 2-х частей гетерогенной ( $Z_{\max}$ ) задается в длинах свободного пробега фотонов (ДСП) в соответствующем веществе для начальной энергии источника. Для источников тормозного излучения ДСП вычисляется для средней энергии спектра, рентгеновского излучения для эффективной энергии спектра  $E_{\text{eff}} = 2/3 E_{\max}$ .

б) В *барьерной геометрии* задается максимальная толщина барьера, но ее можно разбить на определенное (не более 20) число слоев. В этом случае последовательно будут вычисляться ФН для барьеров с толщинами, равными толщине одного, 2-х, 3-х и т.д. слоев.

7) В *полубесконечной геометрии* задается расстояние до последнего детектора (однородная защита) или толщины обоих веществ – для гетерогенной защиты. Во втором веществе это расстояние до последнего детектора. Полубесконечная геометрия достигается добавлением к заданному размеру по Z еще слоя вещества, толщиной в 1 ДСП для энергии источника. Затем надо задать число детекторов, которые располагаются на одинаковых расстояниях друг от друга. Если их число меньше 20, то добавляется еще один в начале защиты на расстоянии 0,01 ДСП от источника.

ПОМНИТЕ, что в полубесконечной геометрии величина ФН при  $Z=0$  не равна 1 за счет отраженного излучения.

8) В *барьерной геометрии* можно задать произвольный радиус (R) барьера и проводить расчет ФН в ограниченной по R геометрии. У бесконечного по радиусу барьера  $R=10*Z_{\max}$ . Барьер на экране рисуется в одном масштабе по X и по Y. Если радиус барьера больше его толщины, то на рисунке геометрии (на нем затем строятся траектории частиц) отображается лишь центральная по радиусу часть барьера. В этой геометрии размер детектора по радиусу также может быть произвольным от 0,1 см до радиуса барьера.

9) В *полубесконечной геометрии* защита по R бесконечная ( $R=10*Z_{\max}$ ) и на рисунке всегда отображается лишь центральная по R часть защиты. Радиусы всех детекторов равны радиусу защиты.

10) В последнюю очередь задается статистическая погрешность расчета.

#### ПОСЛЕ ЭТОГО НАЧИНАЕТСЯ РАСЧЕТ

Одновременно рассчитываются 3 типа ФН: числовой ( $V_n$ )-для потока фотонов, энергетический ( $V_e$ ) – для потока энергии фотонов, дозовый ( $V_d$ ) для поглощенной дозы в воздухе за барьером – в барьерной геометрии или в веществе защиты – в полубесконечной геометрии. В этой геометрии учитывается рассеянное излучение, летящее во всех направлениях.

## РАСЧЕТ В БАРЬЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ

а) Расчет ФН для каждого слоя проводится в два этапа:

(I) расчет нерассеянного излучения за слоем в соответствии с экспоненциальным ослаблением;

(II) расчет рассеянного излучения методом Монте-Карло.

б) Расчет ФН для каждого слоя продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность для всех типов ФН.

в) Результирующая погрешность вычисляется как погрешность косвенных измерений, причем для нерассеянного излучения погрешность по умолчанию задается в 10 раз меньшая, чем для рассеянного излучения. Поэтому расчет нерассеянной компоненты излучения за барьером с такой большой точностью для источников с непрерывным спектром и изотропным угловым распределением требует определенного времени, т.к. выполняется интегрирование по спектру и угловому распределению фотонов источника.

г) В процессе расчета в левом небольшом окне отображаются его этапы:

(I) установка барьера, детектора и расчет нерассеянного излучения;

(II) установка детектора и расчет рассеянного излучения. 10000 первых траекторий первичных фотонов и вторичных частиц также отображаются в этом окне.

д) Если нажать клавишу «След-й слой», то заканчивается расчет данного слоя независимо от достигнутой погрешности и осуществляется переход к расчету следующего слоя.

Программа сама переходит к расчету следующего слоя (или заканчивает расчет), если достигнута заданная погрешность для всех 3-х ФН. Чем толще слой, тем больше время расчета до достижения заданной погрешности.

## РАСЧЕТ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Расчет ФН для всей защиты выполняется в два этапа:

(I) расчет нерассеянного излучения последовательно для всех детекторов в соответствии с экспоненциальным ослаблением;

(II) расчет рассеянного излучения методом Монте-Карло во всей защите и для всех детекторов одновременно.

Результаты расчета выводятся в правое окно в текстовом и в графическом виде. Для переключения между этими режимами вывода нажимайте клавишу «Текст» («Рисунок»). Используйте эти переключения, чтобы сменить Ymax при графическом выводе. В текстовом выводе MFP=ДСП (длина свободного пробега).

Для приостановки и последующего продолжения расчета используйте раздел меню **Pause**.

Расчет заканчивается, когда достигнута заданная погрешность у всех типов ФН для всех детекторов. Чем дальше детектор, тем больше погрешность его показания.

После расчета (если не чистить экран) или после нажатия **Pause** любую часть экрана можно выделить (раздел меню **Edit**), скопировать в буфер и затем поместить в файл, например, Word-файл.

**ВНИМАНИЕ!** При работе программы ФН создается специальный файл `fn_res.txt`, который находится в папке `...\PCLAB\BF\`. В этот файл помещается информация о вводимых данных, полученных результатах моделирования и о

ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть во время расчета.

Через раздел меню **Change** в процессе расчета можно изменить:

**Precision** – точность расчета;

**Max Phot** – число вторичных фотонов, которые появляются при расщеплении траектории первичного фотона (элемент неаналогового моделирования).

В пункте меню **BF**  $\Rightarrow$  **Questions** находятся вопросы для проверки знаний, а в пункте **BF**  $\Rightarrow$  **Tasks** варианты заданий для моделирования, которые можно выполнить в режиме BF.

### **3.4. Режим РАСЧЕТ КОНСТАНТ (CONST)**

Все режимы работы, в которых проводится моделирование, используют файлы данных, рассчитанные с помощью CONST. Аналогичные программы расчета констант являются необходимой составной частью всех известных программ: GEANT, EGS, ETRAN и т.д.

1) В этом режиме рассчитываются константы для электронов, позитронов, протонов, фотонов и мюонов.

2) Расчет всех распределений, кроме сечений фотонов, ведется с двойной точностью. Рассчитывается следующая информация:

#### **ЭЛЕКТРОНЫ**

- среднее число катастрофических столкновений при замедлении до  $E_{\min}$  (Opt way),
- катастрофическое сечение ионизационных столкновений (Kat S ion),
- катастрофическое сечение радиационных столкновений (Rad kat S),
- полный средний пробег ( $R_0$ ),
- средний пробег за счет малых передач энергии (меньше пороговой энергии) на столкновения и излучение ( $R_n$ ),
- $\langle 1 - \cos(u) \rangle$  за счет многократного рассеяния,
- длина отрезка траектории  $ds$  в долях  $R_n$  ( $ds/R_n$ ),
- массовая толщина отрезка траектории  $ds$ ,
- величина  $\Omega_0$  из распределения Мольера для отрезка  $ds$  ( $OM_0(ds)$ ),
- число упругих столкновений на отрезке  $ds$  в соответствии с сечением упругого рассеяния  $S_{el}$  ( $S_{el} * ds$ ),
- полная тормозная способность вещества  $(dE/dx)_t$ ,
- тормозная способность на столкновения  $(dE/dx)_i$ ,
- на излучение  $(dE/dx)_r$ ,
- полная тормозная способность за счет малых передач энергии на столкновения и излучение  $(dE/dx)_n$ ,
- сечение ионизации K оболочки (SIEK),
- сечение ионизации L оболочки (SIEL),
- сечение упругого рассеяния (S elast),
- среднее число столкновений при замедлении до  $E_{\min}$  с учетом этого сечения (Opt way+elastic),

- корректирующие поправки к распределениям продольных ( $A_z$ ) и поперечных ( $A_r$ ) смещений,
- интегральные распределения Гоудсмита-Саундерсона (Г-С).

### **ПОЗИТРОНЫ**

- среднее число катастрофических столкновений при замедлении до  $E_{\min}$  (Opt way),
- катастрофическое сечение ионизационных столкновений (Kat S ion),
- катастрофическое сечение радиационных столкновений (Rad kat S),
- сечение аннигиляции (S annih),
- полный средний пробег ( $R_0$ ),
- средний пробег за счет малых передач энергии (меньше пороговой энергии) на столкновения и излучение ( $R_n$ ),
- длина отрезка траектории  $ds$  в долях  $R_n$  ( $ds/R_n$ ),
- массовая толщина отрезка траектории  $ds$ ,
- величина  $\Omega_0$  из распределения Мольера для отрезка  $ds$  ( $OM_0(ds)$ ),
- число упругих столкновений на  $ds$  в соответствии с сечением упругого рассеяния  $S_{el}$  ( $S_{el} * ds$ ),
- полная тормозная способность вещества  $(dE/dx)_t$ ,
- тормозная способность на столкновения ( $dE/dx$ ) $_i$ ,
- на излучение  $(dE/dx)_r$ ,
- полная тормозная способность за счет малых передач энергии на столкновения и излучение  $(dE/dx)_n$ ,
- $\langle 1 - \cos(u) \rangle$  за счет многократного рассеяния,
- сечение упругого рассеяния (S elast),
- среднее число столкновений при замедлении до  $E_{\min}$  с сечением упругого рассеяния (Opt way+elastic),
- корректирующие поправки к распределениям продольных ( $A_z$ ) и поперечных ( $A_r$ ) смещений,
- интегральные распределения Гоудсмита-Саундерсона (Г-С).

### **ПРОТОНЫ**

- среднее число катастрофических столкновений при замедлении до  $E_{\min}$  (Opt way),
- катастрофическое сечение ионизационных столкновений (Kat S ion),
- тормозная способность на столкновения  $(dE/dx)_i$ ,
- тормозная способность на столкновения за счет малых передач энергии  $(dE/dx)_n$ ,
- полный средний пробег ( $R_0$ ),
- средний пробег за счет малых передач энергии (меньше пороговой энергии) на столкновения ( $R_n$ ),
- сечение ионизации К оболочки (SIEK),
- сечение ионизации L оболочки (SIEL).

## **ФОТОНЫ**

- сечение фотоэффекта (S phot),
- сечение комптоновского рассеяния (S compt),
- сечение когерентного рассеяния (S coher),
- сечение образования  $e^+e^-$  пар в поле ядра (S pair),
- в поле атомного электрона (S tripl),
- сечение поглощения энергии (S abs E),
- полное сечение (S tout) (без когерентного),
- полное сечение S(tout+coh).

## **МЮОНЫ**

- среднее число катастрофических столкновений при замедлении до  $E_{min}$  (Opt way),
- катастрофическое сечение ионизационных столкновений (Kat Sion),
- катастрофическое сечение тормозного излучения (ТИ) (Kat Sbrem),
- катастрофическое сечение рождения  $e^+e^-$  пар (Kat Spar),
- полное сечение неупругого взаимодействия с ядрами (S nuc),
- полный средний пробег ( $R_0$ ),
- средний пробег за счет малых передач энергии (меньше пороговой энергии) на столкновения, ТИ и образование  $e^+e^-$  пар ( $R_n$ ),
- тормозная способность за счет малых передач энергии на столкновения, ТИ и образование  $e^+e^-$  пар  $(dE/dx)_n$ ,
- полная тормозная способность  $(dE/dx)_t$ ,
- тормозная способность на ионизацию и возбуждение атомов  $(dE/dx)_i$ ,
- тормозная способность на ТИ  $(dE/dx)_r$ ,
- тормозная способность на образование  $e^+e^-$  пар  $(dE/dx)_p$ ,
- тормозная способность на фотоядерные взаимодействия  $(dE/dx)_{nu}$ .

Минимальная энергия расчета констант для электронов, позитронов и протонов 0,008 МэВ, для мюонов 0,7 МэВ, для фотонов 0,001 МэВ. Максимальная энергия для всех частиц  $10^6$  МэВ. Расчет характеристик взаимодействия мюонов:

тормозное излучение для  $T > 100$  МэВ;

образование  $e^+e^-$  пар для  $T > 1000$  МэВ;

фотоядерные взаимодействия для  $T > 150$  МэВ;

Пороговая энергия ионизационных столкновений у всех заряженных частиц одна. Пороговая энергия тормозного излучения у электронов, позитронов и мюонов одна.

3) Информацию о сечениях и некоторых распределениях для расчета переноса электронов, позитронов, фотонов, протонов можно найти в работе [1]; данные для фотонов взяты из работ [2, 3], сечения взаимодействия мюонов имеются в работах [4–7]. Много данных, которые программа CONST использует для своей работы (например, атомные веса и плотности элементов, энергии атомных уровней и т.д.) теперь вставлены в программу PCLAB.

4) Рабочая папка программы – \CONST\ в папке PCLAB.

5) Вся информация о том, что вводится, как работает программа, сбрасывается в файл const\_res.txt.

6) В папке CONST должны находиться 5 файлов: esls.tab, scoh.tab, spar.tab, strip.tab, elast\_el.tab – это таблицы сечений для электронов и фотонов.

7) В папке CONST находятся также 3 папки:

\FDC\ – сюда помещаются файлы \*.fdc. Это файлы данных констант. В этих текстовых (ASCII) файлах находится входная информация для программы;

\FCE\ – сюда помещаются файлы \*.fce. Это бинарные файлы, куда помещаются результаты расчета. Именно эти файлы нужны для работы всех режимов PCLab, в которых проводится статистическое моделирование (например, файлы: dat1(2,3,4)demo.fce);

\FRC\ – сюда помещаются файлы \*.frc. Это текстовые (ASCII) файлы с результатов расчета и с их размерностями. Результаты представлены в виде таблиц. Их можно посмотреть, напечатать, нарисовать.

8) **ВНИМАНИЕ!** Расширения файлам программа приписывает сама. Имена файлов \*.fce и \*.frc программа сохраняет как у файлов \*.fdc. Имя этого файла (без расширения) не должно превышать 8 букв и цифр. Используйте английские буквы.

9) Чтобы выполнить расчет констант необходимо задать:

а) вещества, в которых затем будет проводиться моделирование методом Монте-Карло. Вещество может быть простым – состоит из одного элемента (например, свинец) или сложным – состоит из нескольких элементов (например, вода). Максимальное количество веществ = 25, элементов = 100;

б) энергетический диапазон  $E_{min}$ – $E_{max}$ , для которого проводится расчет констант (все энергии в МэВ). Наименьшее значение  $E_{min} = 0,008$  МэВ (в этом случае можно моделировать траектории заряженных частиц до энергии 0,01 МэВ). Наибольшее значение  $E_{max} = 10^6$  МэВ, т.к. это максимальная энергия, для которой имеются данные по сечениям фотонов;

в) пороговую энергию ионизационных столкновений  $E_{ion}$  – это минимальная энергия дельта-электронов;

г) пороговую энергию радиационных столкновений  $E_{rad}$  – минимальная энергия фотонов тормозного излучения;

д)  $E_{cut}$  – минимальную энергию образования  $e^+e^-$  пар для мюонов (это граничная энергия, разделяющая непрерывные и катастрофические потери энергии для этого процесса взаимодействия).

10) Расчет констант проводится в двух режимах: NEW и OLD.

**РАСЧЕТ В РЕЖИМЕ NEW.** При расчете констант в этом режиме необходимые данные вводятся с клавиатуры.

а) Сначала вводятся вещества, для которых проводится расчет. Вещество может быть сложным – состоит из не менее чем 2-х элементов или простым – состоит из 1-го элемента. При вводе простого вещества вводится его атомный номер и уточняется плотность. Таблица с характеристиками элементов от  $Z=1$  до  $Z=100$  находится в меню **CONST**  $\Rightarrow$  **Elements**. Для сложного вещества надо задать имя вещества. Имя сложного вещества **НЕ ДОЛЖНО ПРЕВЫШАТЬ 16 символов**. Используйте английские строчные буквы и цифры. Если имя веще-

ства имеется в базе веществ (меню **CONST**  $\Rightarrow$  **Substens**), то ввод осуществляется автоматически из базы. Надо лишь уточнить плотность. Если такого вещества нет в базе, то надо задать число элементов в нем, плотность, а затем атомные номера и весовые доли каждого элемента. Помещайте часто используемые вещества в базу, это облегчает ввод.

б) Затем надо определить  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$ ,  $E_{\text{ion}}$ ,  $E_{\text{rad}}$ ,  $E_{\text{cut}}$ .

в) В последнюю очередь надо задать имя файла данных констант (обязательно) и определить надо или нет создавать текстовый и бинарный файлы результатов расчета.

После этого начинается расчет. Информация о том, что он идет, выводится на экран.

**РАСЧЕТ В РЕЖИМЕ OLD.** При расчете в этом режиме необходимые данные вводятся из находящегося в папке FDC файла данных ?.fdc. Т.е. расчет проводится для старого набора веществ. После ввода можно изменить  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$ ,  $E_{\text{ion}}$ ,  $E_{\text{rad}}$  и  $E_{\text{cut}}$ . Можно изменить имя файла, чтобы сохранить рассчитанные данные под новым именем.

Файл данных можно предварительно создать по аналогии с файлами, уже находящимися в FDC. Например, файл для расчета констант для двух веществ: сложного (воздух) и простого (свинец) имеет следующую структуру:

```
subs ( air )
  3      0.12900D-02  0.12500D-01
  0.70000D+01  0.14000D+02  0.75500D+00
  0.80000D+01  0.16000D+02  0.23200D+00
  0.18000D+02  0.39948D+02  0.13000D-01
elem ( Lead )
  0.82000D+02  0.20720D+03  0.10000D+01  0.11350D+02
  0.15000D-01
ener
  0.10000D-01  0.10000D+03
  0.10000D+00  0.10000D-01  0.50000D+02
  0.70000D+00  0.10000D+03  0.30000D+01
```

2-я стр.: число элементов, плотность, минимальная энергия для распределения Гоудсмита-Саундерсона сложного вещества. Эта энергия должна быть несколько больше  $E_{\min}$ . Кроме этого она зависит от  $Z$  вещества (для сложного вещества определяется элементом с наибольшим  $Z$ ). Зависимость от  $Z$  можно взять из файла dat1demo.fdc. (При вводе с клавиатуры это значение определяет сама программа).

3–5-я стр.:  $Z$ ,  $A$  и  $w$  (весовая доля) элементов вещества.

7-я стр.:  $Z$ ,  $A$ ,  $w$  и плотность простого вещества.

8-я стр.: минимальная энергия для распределения Г-С.

10-я стр.:  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$ .

11-я стр.:  $E_{\text{ion}}$ ,  $E_{\text{rad}}$  и максимальная энергия для распределения Г-С. Эта энергия должна быть несколько меньше  $E_{\max}$ . Если  $E_{\max} > 50$  МэВ, то эта энергия = 50 МэВ.

12-я стр.  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  и пороговая энергия  $E_{\text{cut}}$   $e^+e^-$  пар для мюонов.

После окончания расчета и записи результатов режим работы **CONST** автоматически заканчивается.

В папке CONST находится также программа IMAGE PHOTONS, которая выдает на экран сечения взаимодействия фотонов в графическом виде. Help-файл программы находится в этой же папке.

### **Список литературы**

1. Беспалов В.И. **Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом** учеб. пособие. 5-е изд., дополненное – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 427 с.
2. Storm E. and Israel H.I. **Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100**. Nucl. Data Tables. – 1970, A7. – p. 565-681.
3. Cullen D.E., Hubbell J.H., and Kissel L., **EPDL97: The Evaluated Photon Data Library**, '97 Version, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL – 50400, Vol. 6, Rev. 5, September 1997.
4. Groom D.E., Mokhov N.V., Striganov S.I. **Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV 100 TeV**. Atomic Data and Nuclear Data Tables. V. 76, No. 2, 2001. – p. 1–37.
5. Никишов А.И. **Энергетический спектр e+e- пары, рожденной при столкновении мюона с атомом**. ЯФ, Т. 27, вып. 3, 1978. – С. 1281-1289.
6. Безруков Л.Б., Бугаев Э.В. **Эффекты затенения нуклонов в фотон-ядерных взаимодействиях**. ЯФ, Т. 33, вып. 5, 1981. – С. 1195-1207.
7. Беспалов В.И. **Лекции по радиационной защите: учебное пособие**. 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 694 с.

### **3.5. Режим РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ (PROTECTION)**

#### **3.5.1. Расчет защиты от тормозного излучения (ТИ)**

НАЧАЛО РАСЧЕТА через меню PROTECTION ⇒ **Start BREMSS**

Расчет защиты можно проводить двумя методами: методом номограмм и методом слоев десятикратного ослабления.

#### **РАСЧЕТ МЕТОДОМ НОМОГРАММ**

Возможен расчет как от первичного ТИ (нерассеянное ТИ с учетом через фактор накопления вторичного и рассеянного излучения, образующегося в защите), так и от рассеянного от бетона ТИ. Материалами защиты являются: бетон, железо и свинец. Диапазон максимальных энергий ТИ  $E_{max}$ : 0,5 – 50 МэВ.

#### **1) ПЕРВИЧНОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

Расчет защиты от первичного ТИ проводится по номограммам, полученным в работе [2]. Расчет возможен для направлений вылета ТИ из мишени ускорителя от 0 до 180 град. (относительно направления электронного пучка).

Для конкретного значения тока пучка электронов  $i$  (мА) и расстояния от мишени ускорителя до защищаемой области  $R$  (м) мощность тканевой поглощенной дозы за защитой толщиной  $d$  определяется выражением

$$\dot{D}(E_0; d) = \frac{\dot{D}_0(E_0; d) \cdot i}{R^2} \left( \frac{\text{мкГр}}{\text{ч}} \right) \quad (3.5.1)$$

где  $\dot{D}_0(E_0; d)$  (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) – мощность тканевой поглощенной дозы от ТИ электронного ускорителя на энергию  $E_0$  за защитой толщиной  $d$  для следую-

щих "стандартных" условий: расстояние до защиты равно 1м, ток пучка электронов ускорителя  $i = 1$  мА. Без защиты,  $\dot{D}_0$  – это **мощность показателя тканевой поглощенной дозы** [3]. Для расчета  $\dot{D}_0$  необходимы спектры ТИ для различных значений  $E_0$ . Эти спектры рассчитаны методом Монте-Карло по специальной программе [4]. При расчете этих спектров учтено ослабление ТИ стеклом ускорительной камеры (4 мм).

Учтем условия работы с помощью безразмерного коэффициента  $K$

$$K = \frac{\dot{D}_v}{\dot{D}_{vc}} \frac{\bar{w} \cdot i \cdot 10}{R^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.2)$$

где  $\dot{D}_v$  и  $\dot{D}_{vc}$  – соответственно, мощность показателя дозы реального и некоторого "стандартного" ускорителя [3] (для него рассчитаны значения  $\dot{D}_0$ ), ДМД (мкЗв/ч) – допустимая мощность поглощенной дозы,  $\bar{w}$  – коэффициент качества излучения, 10 (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) – "единица" мощности тканевой дозы за защитой для стандартных условий (численно равна ДМД для персонала гр. А по НРБ-96, в это время были получены "новые" номограммы). Допустимые условия работы с излучением определяются выражением

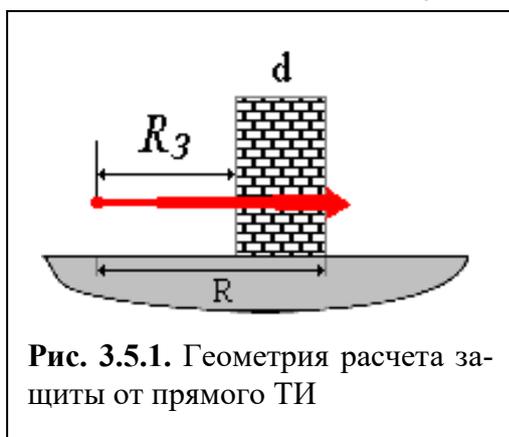
$$\dot{D}(E_0, d) = \bar{w} \cdot \dot{D}_0(E_0, d) \cdot i / R^2 = \text{ДМД}. \quad (3.5.3)$$

Подставив (3.5.3) в (3.5.2), получаем

$$K(E_0, d) = \frac{\dot{D}_v}{\dot{D}_{vc}} \frac{10}{\dot{D}_0(E_0, d)}. \quad (3.5.4)$$

В соответствии с (3.5.4) для  $\dot{D}_v = \dot{D}_{vc}$  рассчитан набор значений  $K$  для различных значений  $E_0$ . Набор кривых  $K=f(d)$  для различных  $E_0$  это и есть новые номограммы. Выражение (3.5.4) показывает, как рассчитать номограммы. Достоинство новых номограмм:

- можно учесть уровень излучения реального ускорителя;
- можно задавать любую ДМД в соответствии с НРБ-99/2009;
- номограммы получены для трех основных веществ защиты: Рb, Fe, бетона.



**Рис. 3.5.1.** Геометрия расчета защиты от прямого ТИ

Выражение (1) показывает, как пользоваться номограммами. Для заданных условий:  $i$ ,  $R$ , ДМД,  $\dot{D}_v$  ( $\dot{D}_{vc}$ ) надо вычислить величину коэффициента  $K$  и по кривой  $K=f(d)$  для данного вещества защиты и  $E_0$  найти толщину защиты.

Программа BREMSS по введенным начальным данным вычисляет величину  $K$  и затем по номограммам, которые находятся в специальных таблицах, находит толщину защиты. При этом используется метод итераций, что позволяет учесть меняющееся вместе с расстоянием до защищаемой области геометрическое ослабление. Для этого выражение (3.5.2) удобно записать в виде:

$$K_n = \frac{\dot{D}_y}{\dot{D}_{yc}} \frac{i \cdot 10}{(R_3 + d_{n-1})^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.5)$$

где  $R = R_3 + d$ ,  $R_3$  – расстояние до защиты (рис. 3.5.1),  $n$  и  $n-1$  это индексы,  $n = 1, 2, \dots$ ;  $d_0 = 0$ . Значения коэффициента  $K$  номограмм находятся в пределах  $K_{\min} - K_{\max}$ , если  $K < K_{\min}$ , то защита не требуется. Если  $K > K_{\max}$ , то толщина защиты находится как  $d = d_1 + d_2$ , где толщина  $d_1$ , рассчитывается по номограммам для  $K = K_{\max}$ , а  $d_2$  – дополнительная толщина защиты, рассчитывается по слоям десятикратного ослабления ( $\Delta_{1/10}$ ). Значения  $\Delta_{1/10}$  находятся по номограммам для  $K = K_{\max}$ .

Для расчета толщины защиты надо ввести:

- энергию электронов  $E_0$ ;
- электронный ток ускорителя  $i$ ;
- направление, в котором рассчитывается защита. Программа позволяет вычислять защиту для 16 направлений выхода ТИ из мишени ускорителя (относительно направления электронного пучка, падающего на мишень): 8 – вперед ( $0-90^\circ$ ) и 8 – назад ( $90-180^\circ$ ). Конструкция ускорителя не учитывается, расчет защиты ведется для незащищенной мишени;
- мощность показателя тканевой поглощенной дозы ускорителя (**внимательно читайте сообщение программы**);
- вещество защиты;
- тип геометрии защиты и расстояние до детектора  $R$  (см. меню Geometries);
- ДМД (**внимательно читайте информацию программы**).

После ввода этих данных выполняется расчет толщины защиты.

Результаты расчета выводятся на экран дисплея, а также записываются в файл. Результат каждого расчета помещается в свой файл. Его имя: NOM\_Pr +

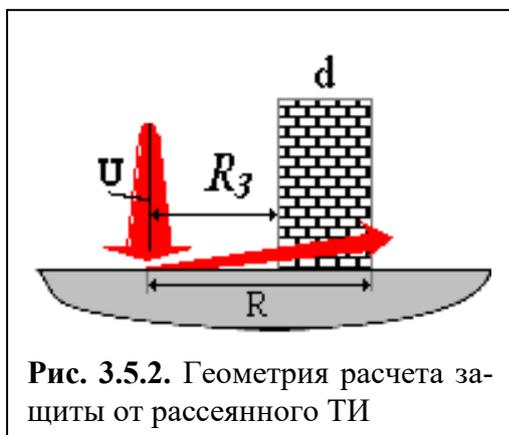


Рис. 3.5.2. Геометрия расчета защиты от рассеянного ТИ

$E_0$ (4 позиции) + вещество (pb-свинец, fe-железо, сп-бетон) + направление (3 позиции) + .txt Этот файл находится в папке: .\PCLAB\PROTECT\BREMSS\. Например, в файл: NOM\_Pr10\_5fe010.txt помещаются результаты расчета защиты из железа для  $E_0 = 10,5$  МэВ в направлении 10 гр. относительно оси пучка ТИ.

На дисплей кроме толщины защиты выводятся значения:  $K_{\min}$ ,  $K_{\max}$ ,  $K$ ,  $\Delta_{1/10}$ , кратность ослабления, число итераций и метод

расчета: номограммы или номограммы +  $\Delta_{1/10}$ .

ПРИМЕЧАНИЕ: если задавать ток 1 мА, то расчет ведется по кратности ослабления реальной мощности дозы ТИ.

## 2) РАССЕЯННОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Под рассеянным будем понимать ТИ, которое сначала падает на некоторую бетонную отражающую поверхность "отражатель" (например, пол или стену помещения) отражается от нее и затем падает на слой защиты (рис. 3.5.2). Номограммы для расчета защиты от рассеянного ТИ получены в работе [5] (см. [1]).

Для конкретного значения тока пучка электронов  $i$  (мА) и расстояния  $R$  (м) от центра площадки, на которую падает первичный тормозной пучок, до защищаемой области (рис. 2) мощность тканевой поглощенной дозы от рассеянного ТИ за защитой толщиной  $d$  определяется выражением

$$\dot{D}_p(E_0; d) = \frac{\dot{D}_{0p}(E_0; d) \cdot i}{R^2} \left( \frac{\text{мкГр}}{\text{ч}} \right), \quad (3.5.6.)$$

где  $\dot{D}_{0p}(E_0; d)$  (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) – мощность тканевой поглощенной дозы от рассеянного ТИ электронного ускорителя на энергию  $E_0$  за защитой толщиной  $d$  для следующих "стандартных" условий: расстояние от центра площадки, на которую падает первичный пучок ТИ, до защиты равно 1 м, ток ускорителя равен 1 мА. Для расчета  $\dot{D}_{0p}(E_0; d)$  необходимы спектры рассеянного ТИ для различных значений  $E_0$ . Эти спектры рассчитаны методом Монте-Карло по специальной программе [4]. Источником излучения являлись спектры первичного ТИ. Направление рассеянного ТИ составляло угол около 90 град относительно нормали к поверхности бетонного отражателя (рис. 3.5.2). Излучение, отраженное в этом направлении, имеет наибольшую энергию и проникающую способность.

Для рассеянного излучения безразмерный коэффициент  $K$ , учитывающий условия работы, записан в виде:

$$K = \frac{\dot{D}_y}{\dot{D}_{yc}} \frac{W}{W_0} \frac{i \cdot 6}{R^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.7)$$

где  $6$  (мкЗв/ч м<sup>2</sup> мА) – "единица" мощности тканевой дозы за защитой для стандартных условий, численно равна ДМД для персонала гр. А при проектировании защиты (по ОСПОРБ-99/2010),  $W$  [стерадиан] – телесный угол коллиматора первичного пучка ТИ,  $W_0 = 1$  ср. Допустимые условия работы с излучением можно записать следующим образом

$$\dot{D}_p(E_0, d) = \dot{D}_{0p}(E_0, d) \frac{i}{R^2} = \text{ДМД}. \quad (3.5.8)$$

С учетом выражения (3.5.8) из (3.5.7) получаем

$$K(E_0, d) = \frac{\dot{D}_y}{\dot{D}_{yc}} \frac{W}{W_0} \frac{6}{\dot{D}_{0p}(E_0, d)}. \quad (3.5.9)$$

В соответствии с (3.5.9), полагая  $\dot{D}_y = \dot{D}_{yc}$  и  $W = W_0$ , рассчитывается набор значений  $K$  для различных значений  $E_0$ . Набор кривых  $K = f(D)$  для различных значений  $E_0$  – это номограммы для расчета защиты от рассеянного ТИ. Выражение (3.5.9) показывает, как рассчитать номограммы, а (3.5.7) – как ими

пользоваться. Если ввести расстояние до защиты  $R_3$  и метод итераций, то выражение (3.5.7) примет следующий вид

$$K_n = \frac{\dot{D}_y}{\dot{D}_{yc}} \frac{W}{W_0} \frac{i \cdot 6}{(R_3 + d_{n-1})^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.10)$$

где как и ранее  $R = R_3 + d$ ,  $R_3$  – расстояние до защиты (рис. 3.5.2),  $n$  и  $n-1$  это индексы,  $n = 1, 2, \dots$ ;  $d_0 = 0$ .

Также, как и для первичного ТИ, излучения значения коэффициента  $K$  номограмм находятся в пределах  $K_{\min} - K_{\max}$ , если  $K < K_{\min}$ , то защита не требуется. Если  $K > K_{\max}$ , то толщина защиты находится как  $d = d_1 + d_2$ , где толщина  $d_1$ , рассчитывается по номограммам для  $K = K_{\max}$ , а  $d_2$  – дополнительная толщина защиты, рассчитывается по слоям десятикратного ослабления. Номограммы получены для трех основных веществ защиты: Pb, Fe, бетона.

Для расчета толщины защиты надо ввести:

- энергию электронов  $E_0$ ;
- электронный ток ускорителя  $i$ ;
- половинный угол раствора коллиматора источника первичного ТИ в град. ( $U$  на рис. 3.5.2);
- мощность показателя тканевой поглощенной дозы ускорителя (**внимательно читайте сообщение программы**);
- вещество защиты;
- тип геометрии защиты и расстояние до детектора  $R$  (см. меню Geometries);
- ДМД (**внимательно читайте информацию программы**).

После ввода этих данных выполняется расчет толщины защиты.

Результаты расчета выводятся на экран дисплея, а также записываются в файл. Результат каждого расчета помещается в свой файл. Его имя: NOM\_Sc+Eo(4 позиции)+вещество (pb-свинец, fe-железо, cn-бетон) +.txt Этот файл находится в папке ... \PCLAB\PROTECTION\BREMSS\ . Например, в файл: NOM\_Sr5\_00pb.txt помещаются результаты расчета защиты из свинца от рассеянного ТИ для  $E_0 = 5$  МэВ.

На экран кроме толщины защиты выводятся значения:  $K_{\min}$ ,  $K_{\max}$ ,  $K$ ,  $\Delta_{1/10}$ , кратность ослабления, число итераций и метод расчета: номограммы или номограммы +  $\Delta_{1/10}$ .

ПРИМЕЧАНИЕ: если задавать ток 1 мА, то расчет ведется по кратности ослабления реальной мощности дозы ТИ.

#### **РАСЧЕТ МЕТОДОМ СЛОЕВ ДЕСЯТИКРАТНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ**

Возможен расчет от первичного ТИ в направлении оси пучка ТИ (0 гр) и от ТИ утечки в направлении 90 гр. ТИ утечки – это ТИ прошедшее защиту головки ускорителя и претерпевшее заметное ослабление в ней. Оно имеет меньшую проникающую способность чем ТИ рабочего пучка (первичное), но большую чем рассеянное ТИ. ТИ утечки, например, необходимо учитывать при расчете защиты для медицинских ускорителей.

## 1) ПЕРВИЧНОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Для расчета защиты от первичного ТИ в направлении  $0^\circ$  Используются два слоя десятикратного ослабления: первый ( $\Delta_{1/10}$ ) и асимптотический ( $\Delta_{1/10}^{ac}$ ) (соответствует кратности ослабления 10 000). Оба слоя рассчитаны в программе КЛ. Диапазон энергий от 0,5 до 50 МэВ. Расчет возможен для трех веществ защиты: свинец, железо, бетон. Для расчета необходимо ввести реальную мощность эквивалентной дозы на расстоянии 1 м от мишени ускорителя, ток вводить не надо.

Результаты расчета выводятся на экран дисплея, а также записываются в файл. Результат каждого расчета помещается в свой файл. Его имя: L10\_Fr+Eo(4 позиции)+вещество(pb-свинец, fe-железо, cn-бетон)+.txt Этот файл находится в папке ... \PCLAB\PROTECTION\BREMSS\.

Например, в файл: L10\_Fr-1\_00fe.txt помещаются результаты расчета защиты из железа для  $E_0 = 1$  МэВ.

## 2) ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ УТЕЧКИ

Расчет защиты проводится в направлении  $90^\circ$  относительно оси пучка ТИ. Диапазон энергий 4–30 МэВ, вещество защиты только бетон. Используется один слой десятикратного ослабления. Для расчета защиты необходимо ввести мощность эквивалентной дозы на расстоянии 1 м от мишени ускорителя, ток вводить не надо.

Результаты расчета выводятся на экран дисплея, а также записываются в файл. Результат каждого расчета помещается в свой файл. Его имя: L10\_Lk+Eo(4 позиции)+.txt Этот файл находится в папке ... \PCLAB\PROTECT\BREMSS\.

Например, в файл: L10\_Lk-4\_00.txt помещаются результаты расчета защиты из бетона для  $E_0 = 4$  МэВ.

Выход из программы BREMSS – кнопка "EXIT";  
Новый расчет – кнопка "NEW CALC".

**ВНИМАНИЕ!** При работе программы BREMSS создается файл bremss\_res.txt, который находится в папке ... \PCLAB\PROTECTION\BREMSS\.  
В этот файл помещается информация о вводимых данных и о *причинах ошибок*, которые могут возникнуть при расчете. В конце расчета туда помещаются результаты расчета защиты (в зависимости от ее толщины): мощность тканевой поглощенной дозы,  $K(d)$ ,  $\Delta_{1/10}(d)$ , и кратность ослабления.

### 3.5.2. Расчет защиты от рентгеновского излучения (РИ)

НАЧАЛО РАСЧЕТА через меню PROTECTION  $\Rightarrow$  Start-XRAIS

Возможен расчет как от первичного РИ (нерассеянное РИ с учетом через фактор накопления вторичного и рассеянного излучения, образующегося в защите), так и от рассеянного от бетона РИ. Материалами защиты являются: бетон, железо и свинец. Расчет защиты возможен только для следующих напряжений рентгеновской трубки  $U_{max}$ (кВ): 75; 100; 125; 150; 175; 200; 250; 300; 350; 400; 450.

## 1) ПЕРВИЧНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Расчет защиты от первичного РИ проводится по номограммам, полученным в работе [6] для спектров РИ, рассчитанных методом Монте-Карло по специальной программе [4] от толстых мишеней из W (см. также [1]). Направление падения электронного пучка на мишень и направление выхода РИ из нее составляют углы по 45 град относительно нормали к поверхности мишени. Первичные спектры РИ являются слабо фильтрованными. При расчете этих спектров учтено прохождение РИ только через слой трансформаторного масла (10мм) и стекло рентгеновской трубки (1,5 мм).

В номограммах из [6] имеется ошибка. ФН для энергий менее 100 кэВ был равен 1, а надо 10 кэВ. Ошибка была исправлена и номограммы пересчитаны в 2009 г. [1]. Изменения коснулись лишь напряжений менее 200 кВ. Наибольшие изменения для бетона, небольшие для свинца.

Для конкретного значения тока пучка электронов  $I$  (мА) и расстояния от анода трубки до защищаемой области  $R$  (м) мощность тканевой поглощенной дозы за защитой толщиной  $d$  определяется выражением

$$\dot{D}(U_{max}; d) = \frac{\dot{D}_0(U_{max}; d) \cdot i}{R^2} \left( \frac{\text{мкГр}}{\text{ч}} \right), \quad (3.5.11)$$

где  $\dot{D}_0(U_{max}; d)$  (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) или (мГр/мин м<sup>2</sup> мА) – мощность тканевой поглощенной дозы от РИ рентгеновской трубки на напряжение  $U_{max}$  за защитой толщиной  $d$  для следующих "стандартных" условий: расстояние от анода трубки до защиты равно 1м, ток трубки  $i = 1$  мА. Без защиты эта величина, деленная на 1,09, есть **радиационный выход (лучевая отдача)** рентгеновской трубки с заданным напряжением  $U_{max}$  [3]. Для расчета  $\dot{D}_0(U_{max}; d)$  необходимы спектры РИ, которые рассчитаны методом Монте-Карло в [6].

Учтем условия работы с помощью безразмерного коэффициента  $K$

$$K = \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{TC}} \frac{\bar{w} \cdot i \cdot 10}{R^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.12)$$

где  $\dot{D}_T$  и  $\dot{D}_{TC}$  – соответственно радиационные выходы реальной и некоторой "стандартной" трубки [3] (для нее рассчитаны значения  $\dot{D}_0$ ), ДМД (мкГр/ч) – допустимая мощность дозы, 10 (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) – «единица» мощности тканевой дозы за защитой для стандартных условий (численно равна ДМД для персонала гр. А по НРБ-96, в это время получены "новые" номограммы),  $\bar{w}$  – коэффициент качества излучения. Допустимые условия работы с излучением определяются выражением

$$\dot{D}(E_{max}, d) = \bar{w} \cdot \dot{D}_0(U_{max}, d) \frac{i}{R^2} = \text{ДМД}. \quad (3.5.13)$$

Подставив (3.5.13) в (3.5.12), получаем

$$K(U_{max}, d) = \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{TC}} \frac{10}{\dot{D}_0(U_{max}, d)}. \quad (3.5.14)$$

В соответствии с выражением (3.5.14) для  $\dot{D}_T = \dot{D}_{TC}$  рассчитан набор значений  $K$  для различных значений  $U_{max}$ . Набор кривых  $K=f(d)$  для различных  $U_{max}$  – это

и есть новые номограммы. Выражение (3.5.14) показывает, как рассчитать номограммы. Достоинство новых номограмм:

- можно учесть радиационный выход реальной трубки;
- можно задавать любую ДМД, например, в соответствии с НРБ-99/2009;
- номограммы получены для трех основных веществ защиты: Pb, Fe, бетона.

Выражение (3.5.12) показывает, как пользоваться номограммами. Для заданных условий:  $i$ ,  $R$ , ДМД,  $\dot{D}_T$  ( $\dot{D}_{TC}$ ) необходимо вычислить величину коэффициента  $K$ , и по кривой  $K=f(d)$  для данного вещества защиты и  $U_{\max}$  найти ее толщину.

Программа XRAYS по введенным начальным данным сначала вычисляет зависимость  $K(d)$ , для заданного  $U_{\max}$ , а затем находит толщину защиты. При расчете защиты используется метод итераций, что позволяет учесть меняющееся вместе с расстоянием до защищаемой области геометрическое ослабление. При этом выражение (3.5.12) удобно записать в виде

$$K_n = \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{TC}} \frac{\bar{w} \cdot i \cdot 10}{(R_3 + d_{n-1})^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.15)$$

где  $R = R_3 + d$ ,  $R_3$  – расстояние до защиты (рис. 3.5.1),  $n$  и  $n-1$  это индексы,  $n=1, 2, \dots$ ;  $d_0 = 0$ . Значения коэффициента  $K$  номограмм находятся в пределах  $K_{\min} - K_{\max}$ , если  $K < K_{\min}$ , то защита не требуется. Если  $K > K_{\max}$ , то толщина защиты находится как  $d = d_1 + d_2$ , где толщина  $d_1$ , рассчитывается по номограммам для  $K = K_{\max}$ , а  $d_2$  – дополнительная толщина защиты, рассчитывается по слоям десятикратного ослабления. Значения  $\Delta_{1/10}$  находятся по номограммам для  $K = K_{\max}$ .

Для расчета толщины защиты надо ввести:

- $U_{\max}$ ;
- радиационный выход (лучевую отдачу) трубки (**внимательно читайте сообщение программы**) Программа выдает 2 значения  $\dot{D}_{TC}$ : одно значение – для нефльтрованного излучения (для него рассчитаны номограммы) и второе значение – для сильно фильтрованного излучения (имеются в литературе [3, 8]);
- ток трубки  $i$ ;
- вещество защиты;
- тип геометрии защиты (см. меню Geometries);
- расстояние до детектора  $R$  (см. рис. 3.5.1);
- ДМД (**внимательно читайте информацию программы**).

После ввода всех данных выполняется расчет толщины защиты.

Результаты расчета выводятся на экран, а также записываются в файл. Результат каждого расчета помещается в свой файл. Его имя:  $gx1$  + вещество (pb-свинец, fe-железо, cn-бетон) +  $U_{\max}$  (3 позиции) + .txt. Этот файл находится в папке ... \PCLAB\PROTECTION\XRAYS\ . Например, в файл:  $gx1cn200.txt$  помещаются результаты расчета защиты из бетона для  $U_{\max}=200$  кВ. На экран кроме

толщины защиты выводятся значения:  $K_{\min}$ ,  $K_{\max}$ ,  $K$ ,  $\Delta_{1/10}$ , кратность ослабления  $k$ , число итераций и метод расчета – номограммы или номограммы +  $\Delta_{1/10}$ .

Выход из программы – кнопка "EXIT";

Новый расчет – кнопка "NEW CALC".

## 2) РАССЕЯННОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Под рассеянным будем понимать РИ, которое сначала падает на некоторую бетонную отражающую поверхность "отражатель" (например, пол или стену помещения) и, отразившись от нее, затем падает на слой защиты (см. рис. 3.5.2). Номограммы для расчета защиты от рассеянного РИ получены в работе [7] для трех веществ защиты: Pb, Fe и бетона.

Номограммы пересчитаны по той же причине, что и номограммы для первичного рентгеновского излучения [1].

Для конкретного значения тока пучка электронов  $i$  (мА) и расстояния  $R$ (м) от центра площадки, на которую падает первичный рентгеновский пучок, до защищаемой области (рис. 3.5.2) мощность тканевой поглощенной дозы от рассеянного РИ за защитой толщиной  $d$  определяется выражением

$$\dot{D}_P(U_{max};d) = \frac{\dot{D}_{0P}(U_{max};d) \cdot i}{R^2} \left( \frac{\text{мкГр}}{\text{ч}} \right), \quad (3.5.16)$$

где  $\dot{D}_{0P}(U_{max};d)$  (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) – мощность тканевой поглощенной дозы от рассеянного РИ рентгеновской трубки с напряжением  $U_{max}$  за защитой толщиной  $d$  для "стандартных" условий:  $R = 1$  м,  $I = 1$  мА. Для расчета  $\dot{D}_{0P}(U_{max};d)$  необходимы спектры рассеянного РИ для разных значений  $U_{max}$ . Эти спектры рассчитаны методом Монте-Карло по специальной программе [4]. Источником излучения являлись спектры первичного РИ. Направление рассеянного РИ составляло угол около 90 град относительно нормали к поверхности бетонной отражающей поверхности (рис. 3.5.2). Излучение, отраженное в этом направлении имеет наибольшую энергию и проникающую способность.

Для рассеянного излучения безразмерный коэффициент  $K$ , учитывающий условия работы, представим в виде:

$$K = \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{TC}} \frac{W}{W_0} \frac{\bar{w} \cdot i \cdot 10}{R^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.17)$$

где 10 (мкГр/ч м<sup>2</sup> мА) – "единица" мощности тканевой дозы за защитой для стандартных условий,  $W$  [ср] – телесный угол коллиматора первичного пучка РИ,  $W_0 = 1$  ср. Допустимые условия работы с излучением можно записать следующим образом

$$\dot{D}_P(U_{max},d) = \bar{w} \cdot \dot{D}_{0P}(U_{max},d) \frac{i}{R^2} = \text{ДМД}. \quad (3.5.18)$$

С учетом выражения (3.5.18) из (3.5.17) получаем

$$K(U_{max},d) = \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{TC}} \frac{W}{W_0} \frac{10}{\dot{D}_{0P}(U_{max},d)}. \quad (3.5.19)$$

В соответствии с (3.5.19), полагая  $\dot{D}_T = \dot{D}_{TC}$  и  $W = W_0$ , рассчитывается набор значений  $K$  для различных значений  $U_{max}$ . Набор кривых  $K = f(d)$  для различных значений  $U_{max}$  – это есть номограммы для расчета защиты от рассеянного РИ. Выражение (3.5.19) показывает, как рассчитать номограммы, а выражение (3.5.17) – как ими пользоваться. Если ввести расстояние до защиты  $R_3$  (рис.3.5.2) и метод итераций, то выражение (3.5.17) примет следующий вид:

$$K_n = \frac{\dot{D}_T}{\dot{D}_{TC}} \frac{W}{W_0} \frac{\bar{w} \cdot i \cdot 10}{(R_3 + d_{n-1})^2 \cdot \text{ДМД}}, \quad (3.5.20)$$

где как раньше  $R = R_3 + d$ ,  $n$  и  $n-1$  это индексы  $n = 1, 2, \dots$ ;  $d_0 = 0$ .

Для расчета толщины защиты надо ввести:

- $U_{max}$ ;
- ток рентгеновской трубки  $i$ ;
- радиационный выход трубки (*внимательно читайте сообщение программы*);
- вещество защиты;
- тип геометрии защиты (см. меню Geometries);
- расстояние до детектора  $R$  (см. рис. 3.5.2);
- половинный угол раствора коллиматора источника первичного РИ в град. ( $U$  на рис. 3.5.2);
- ДМД (*внимательно читайте информацию программы*).

После ввода всех данных выполняется расчет толщины защиты.

Результат каждого расчета помещается в свой файл. Его имя формируется аналогично файлу для прямого излучения:  $rx2 + \text{вещество (pb-свинец, fe-железо, sp-бетон)} + U_{max}$  (3 позиции) + .txt. На экран кроме толщины защиты выводятся значения:  $K_{min}$ ,  $K_{max}$ ,  $K$ ,  $\Delta_{1/10}$ , кратность ослабления  $k$ , число итераций и метод расчета – номограммы или номограммы +  $\Delta_{1/10}$ .

Выход из программы – кнопка "EXIT";

Новый расчет – кнопка "NEW CALC".

При работе программы BREMSS создается файл `bremss_res.txt`, который находится в директории `..\PCLAB\PROTECTION\XRAYS\`. В этот файл помещается информация о вводимых данных и о ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть при расчете. В конце расчета туда помещаются результаты (в зависимости от толщины защиты): мощность тканевой дозы за защитой,  $K(d)$ ,  $\Delta_{1/10}(d)$ ,  $\Delta_{1/2}(d)$ , кратность ослабления, средняя энергия спектра РИ за защитой.

### 3.5.3. Расчет функции ослабления цилиндрического источника

1. Рассчитывается функция ослабления  $G(k;p;u;g)$  цилиндрического, моноэнергетического, изотропного, однородного источника фотонов в радиальном направлении (в т.  $P_1$  см. рис. 3.5.3) с учетом ослабления в защите и самопоглощения в источнике.

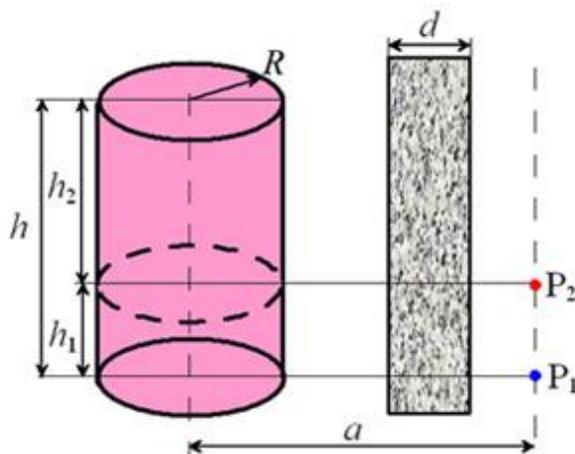
2. Одновременно рассчитывается эквивалентная доза в т.  $P_1$  для следующих условий:

- а) вся активность источника = 1 Ки;

б) гамма-постоянная = 1 аЗв\*м<sup>2</sup>/с\*Бк;

в) дозовый ФН = 1.

Интегрирование функции влияния (ядра ослабления) по объему источника выполняется методом Монте-Карло. Связь параметров функции  $G$  с размерами источника и геометрией облучения дана на рис. 3.5.3, где  $u$  – это расстояние в ДСП в источнике,  $g$  – в защите.



$$\text{В т. } P_1 \left( \frac{dH}{dt} \right)_1 = 3,6 \cdot 10^{-5} \frac{2 A \Gamma_H}{\pi R h} B_D(g) G(k; p; u; g) \left( \frac{\text{мкЗв}}{\text{ч}} \right),$$

где  $k = h/R$ ;  $p = a/R$ ;  $u = \Sigma_S R$ ;  $g = \Sigma d$ ;  $\Sigma_S, \Sigma$  – соответственно линейные коэффициенты ослабления фотонов в источнике и защите;  $R, h$  в см. В т.  $P_2$

$$\left( \frac{dH}{dt} \right)_2 = 3,6 \cdot 10^{-5} \frac{2 A \Gamma_H}{\pi R h} B_D(g) [G(k_1; p; u; g) + G(k_2; p; u; g)],$$

где  $k_1 = h_1/R$ ;  $k_2 = h_2/R$ . ( $R$  и  $h$  в см)

**Рис. 3.5.3.** К расчету функции  $G(k;p;u;g)$  для цилиндрического источника

НАЧАЛО РАСЧЕТА → Start  $G(k;p;u;g)$

Необходимо ввести:

- радиус источника  $R$  (см);
- его высоту  $h$  (см);
- расстояние  $a$  (см) от центра источника до т.  $P_1$  ( $a > R!$ );
- коэффициенты ослабления фотонов в источнике и защите (они могут равняться 0);
- толщину защиты  $d$  (если ее нет  $d = 0$ ).

Если при первом вводе данных допущена ошибка, то надо закончить ввод всех данных и затем повторить его (или изменить только часть введенных данных). Расчет функции  $G()$  выполняется до достижения относительной погрешности 1%. После расчета и выдачи результатов программа предложит выбрать продолжение – нажать одну из кнопок. Так можно менять лишь одно значение входных данных или заменить все. Учесть вклад рассеянного излучения в источнике и защите можно с помощью ФН. При наличии защиты рассеянным излучением в источнике можно пренебречь.

### **Список литературы**

1. Беспалов В.И. **Лекции по радиационной защите**: учебное пособие. 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 695 с.
2. Беспалов В.И., Колбаенкова И.И., Штейн М.М. **Номограммы для расчета защиты от прямого тормозного излучения** // Дефектоскопия. – № 1. – 2002. – С. 83–95.
3. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. **Защита от ионизирующих излучений**, Справочник, М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. Беспалов В.И. **Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц** // Изв. вузов Физика, Приложение. – 2000. – № 4. – С. 159–165.
5. Беспалов В.И., Колбаенкова И.И. **Номограммы для расчета защиты от рассеянного тормозного излучения**. В сб. «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» – 8-я Российская конференция, тезисы докладов. Обнинск: 2002, с. 78–80.
6. Беспалов В.И., Штейн М.М., Котенко Е.Н. **Номограммы для расчета защиты от прямого рентгеновского излучения**, Дефектоскопия, №7,2000, с.44–55.
7. Беспалов В.И., Штейн М.М., Попова П.А. **Номограммы для расчета защиты от рассеянного рентгеновского излучения**. – Дефектоскопия, 2000, № 8, с. 92–98.
8. Румянцев С.И., Добромыслов В.А., Борисов О.И. **Типовые методики радиационной дефектоскопии и защиты**. – М.: Атомиздат, 1979.

### **3.6. Режим БАРЬЕР (BARRIER)**

*(На основе программы ЕРНСА2 [1])*

#### **3.6.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются**

Рассчитываются следующие *интегральные* характеристики:

- поглощенная энергия в каждой зоне барьера;
- $Tn(z)$  – число частиц,  $E(z)$  – их энергия за барьером в зависимости от его толщины (для электронов, позитронов, фотонов и протонов);
- $\langle E \rangle$  – средняя энергия частиц за барьером;
- $An(z)$  – числовое,  $Ae(z)$  – энергетическое альбедо (квазиальбедо) в зависимости от толщины барьера (для всех частиц);
- $E_{ref}$  – энергия отраженных от барьера частиц (для всех частиц);
- $dE/dz$  – распределение поглощенной энергии по толщине барьера;
- $Stop\ e1$  – распределение по толщине барьера остановившихся электронов,  $Stop\ p1$  – протонов с энергиями менее  $E_{min}$ ;
- $q(z)$  – распределение поглощенного заряда по толщине барьера;
- $+Jz$  – проекция электрического тока на ось  $OZ$  в зависимости от толщины барьера;
- $\langle t \rangle$  – среднее время выхода из частиц из барьера в зависимости от его толщины (для всех частиц).
- $E_b(z)$  – поглощенная энергия в слое воздуха толщиной 1 см перед барьером от отраженных частиц;

- $E_f(z)$  – поглощенная энергия от частиц в слое воздуха толщиной 1 см за барьером;
  - $A_{dose}$  – дозовое альбедро фотонов, только для фотонного источника;
  - $K(z)$  – коэффициент ослабления мощности поглощенной дозы в воздухе для прошедших фотонов (только для фотонного источника);
  - $D(z) f$  – поглощенная доза в воздухе за барьером данного R от всех частиц, выходящих из барьера вперед, средняя по площади барьера. Нормировка на 1 частицу источника.
  - $dD/dt f$  – мощность поглощенной дозы в воздухе за барьером данного R от всех частиц, выходящих из барьера вперед, средняя по площади барьера. Для радионуклидного источника. Нормировка на 1 Бк;
  - $D(z) b$  ( $dD/d(z)b$ ) – то же для частиц, выходящих из барьера назад;
  - $f(z)$  – зависимость флюенса (плотности потока) всех частиц от  $z$ ;
  - $D_p(z)$  – распределение поглощенной дозы по толщине барьера от всех частиц на 1 частицу источника. Средняя в слое с заданным R вычисления данных. Рассчитывается только для веществ, находящихся в 1-й по R зоне;
  - $dD/dt(z)$  – распределение мощности поглощенной дозы по толщине барьера от всех частиц для радионуклидного источника. Нормировка на 1 Бк. Средняя в слое с заданным R вычисления данных. Рассчитывается только для веществ, находящихся в 1-й по R зоне;
- Рассчитываются следующие *дифференциальные* характеристики:
- $N(E)$  – спектр,  $IN(E)$  – интегральный спектр частиц, вылетающих из барьера заданной толщины (для всех частиц);
  - $IE(E)$  – интегральный спектр энергии частиц, вылетающих из барьера заданной толщины (для всех частиц);
  - $IN/IN_{max}$  – доля частиц с энергией меньше  $E$  в спектре;
  - $IE/IE_{max}$  – доля энергии всех частиц меньше  $E$  в спектре;
  - $J(E)$  – спектр энергии частиц, вылетающих из барьера заданной толщины (для всех частиц);
  - $N(E, tet)$  – спектры электронов и фотонов в заданном телесном угле (от  $\vartheta_1$  до  $\vartheta_2$ );
  - $N(u)$  – угловое распределение числа частиц,  $E(u)$  – их энергии,  $IN(u)$  – интегральное угловое распределение числа частиц,  $IE(u)$  – их энергии за барьером заданной толщины (для всех частиц);
  - $IN/IN_{max}$  – доля частиц, имеющих угол вылета из барьера меньше  $u$ ;
  - $N(r)$  – радиальное распределение числа частиц,  $E(r)$  – их энергии за барьером (для всех частиц);
  - $2\pi N(r)$  – число частиц,  $2\pi E(r)$  – их энергия на 1 см в интервале от  $r_i$  до  $r_{i+1}$ ;
  - $IN(r)$  – интегральное радиальное распределение числа частиц,  $IE(r)$  – их энергии;
  - $IN/IN_{max}$  – доля частиц,  $IE/IE_{max}$  – их энергии в интервале  $r_i - r_{i+1}$ ;

- $N(t)$  – временные распределения частиц, вылетающих из барьера заданной толщины (для всех частиц);
- $dE(r)$  – радиальное распределение поглощенной энергии,  $D(r)$  – поглощенной дозы за барьером в слое воздуха 1 см (только для вылетающих из барьера фотонов);
- $IdE(r)$  – интегральное распределение поглощенной энергии,  $ID(r)$  – дозы за барьером от вылетающих фотонов;
- спектры, угловые и радиальные распределения отраженных частиц и их энергии (для всех частиц);
- временные распределения отраженных частиц (для всех частиц).

### 3.6.2. Порядок работы в режиме BARRIER

1) Работа начинается через меню: BARRIER  $\Rightarrow$  **Start BARRIER**

Правильная остановка программы BARRIER  $\Rightarrow$  **Stop BARRIER**;

Выход из программы **File**  $\Rightarrow$  **Exit**;

Остановка работы на некоторое время **Pause**  $\Rightarrow$  **Pause**;

Продолжение работы **Pause**  $\Rightarrow$  **Resume**.

2) В режиме BARRIER необходимые для расчета данные вводятся из файла данных. Оформление таких файлов см. ниже. Файл с данными для расчета должен находиться в папке ... \PCLAB\BARRIER.

3) Программа предложит выбрать одну из 4-х геометрий, в которой будет изображен барьер (в большом окне). В это окно выводятся траектории частиц и результаты расчета в графическом виде. Рисовать или нет траектории, решайте через меню **Change**  $\Rightarrow$  **Trajectories**.

4) В двух маленьких окнах слева отображаются цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории.

5) Первые восемь кнопок позволяют управлять информацией в большом окне при выводе результатов расчета в графическом виде (см. рис. 2.9). Работают, если на 1-й кнопке включено «DATA».

**1-я** выводит рисунок барьера и траектории частиц (FIGURE) или результаты в графическом виде (DATA);

**2-я** устанавливает общий тип отображаемых результатов интегральные (INTEGER), дифференциальные (DIFFERENTIAL);

**3-я** меняет тип выводимых интегральных или дифференциальных результатов. *Не все результаты, которые вычисляются, отображаются в графическом виде.*

**4-я** меняет тип частиц, характеристики поля излучения которых выводятся на экран;

**5-я** меняет номер барьера, для которого выводятся дифференциальные характеристики частиц;

**6-я** позволяет включить режим AUTO, при котором результаты на экране перерисовываются после расчета определенного количества историй, или это надо делать самостоятельно (MANUAL);

**7-я** изменяет тип шкалы оси OY: линейная (Linear) или логарифмическая (Log(base 10));

**8-я** изменяет тип шкалы оси OX: линейная (Linear) или логарифмическая (Log(base 10)).

**9-я** включает (Part. YES) и выключает (Part. NO) режим графической выдачи траекторий частиц на экран.

**10-я** (GEOM: xxx) позволяет изменить тип геометрии барьера в процессе расчета.

**11-я** (Image) позволяет записать в файл(bmp) изображение с графического окна. Работает всегда.

На всех результатах указывается статистическая погрешность расчета, если она превышает 1%. На экран выводится среднее значение  $\pm$  среднеквадратическое отклонение.

При работе режима BARRIER создаются следующие txt-файлы:

а) eph2\_res.txt В этот файл помещается информация о начальном этапе работы программы.

б) файл с именем, как у файла данных, но с расширением .re2. Например, exampl\_2.de2  $\Rightarrow$  exampl\_2.re2. В этот файл помещаются вводимые данные и результаты в конце расчета. В нем также находится информация о этапах работы программы и ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть при вводе данных и во время моделирования.

в) res\_prog.re2 – это файл промежуточных результатов. Создается и переписывается периодически после моделирования числа историй = NIST\_PR.

Все файлы находятся в папке... \PCLAB\BARRIER. Их можно смотреть в любом txt-редакторе.

Новый расчет начинайте после закрытия окна предыдущего расчета. Это необходимо, чтобы сбросить все переменные в начальное состояние.

### 3.6.3. Структура файлов данных в режиме BARRIER

Режим BARRIER вводит необходимые для расчета данные из файла данных, который должен иметь расширение .de2 и длину не более 20 символов. Рассмотрим порядок составления этих файлов. Несколько файлов данных с именами exampl\*.de2, а также два файла констант: exampl\_6.fce и dat4demo.fce находятся в папке ...PCLAB\BARRIER. Копии файлов данных находятся в папке ...PCLAB\BARRIER\EXAMPLES.

#### ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ФАЙЛОВ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим в качестве примера структуру файла exampl\_3.de2

**ЗАДАЧА:** Барьер неоднородный по R и Z. Источник кольцевой внутренней. Спектр задан гистограммой, угловое распределение функцией.

simple

exampl\_6.fce

TITLE: Сложный барьер. Ист-к кольцевой внутр-й, рентген-е изл-е 150 кВ, g(teta).

10,4

! LZ,LR

5.,2.,0.1,3.,0.5,5.,0.2,5.,0.2,3.

! dZ

6.,4.,3.,3.

! dR

2,1,1,1,6,1,4,1,3,1

2,1,5,1,6,1,4,1,3,1

2,1,5,1,6,1,1,1,3,1	
2,1,5,1,6,1,1,1,1,1	! NBZ
1	! NBZ_NO
0.,2.,5.,6.,7.,7.1,8.1,9.1,10.1,10.6,11.6,12.6,13.6,14.6,15.6,15.8, 17.8,20.8,21.,22.,23.,24./	! ZRI()
3	! NZRD
10.6,15.8,21.	! ZRD
0	! NALB
0,0.01,0.025	! NFE,Emin,dE
0.,.005.,.006.,.008.,.01.,.015.,.02.,.025.,.03.,.04.,.05.,.06.,.08.,.1.,.12.,.14, .16.,.18.,.2.,.22.,.25/	! FE()
0,30.0,35.0	! NPSP_T,T1_SP,T2_SP
0.,.5.,.10.,.15.,.20.,.25.,.30.,.40.,.50.,.60.,.70.,.80.,.90./	! FT()
.0.,.5,1.,.2.,.3.,.4.,.5.,.6.,.7.,.8.,.9.,.10.,.11.,.12.,.13.,.14.,.15.,.16./	! FR()
.0.,.01.,.02.,.03.,.04.,.05.,.06.,.07.,.08.,.09.,.1,1.e9/	! FTT()
3	! NSTR
1	! NPE
1	! NPG
0	! NPOZ
0	! NPROT
0	! PR_FIELD (Поля нет)
999999999	! NISTM
100000	! NIST_PR
1000	! NTR
1	! ITZAD
3,7,6,19,0,14	! NCFIG
ist3g	! nameist

1-я строка [simple]-тип файла (simple или complex). Файлы данных simple более простые и часть информации для программы вводится по умолчанию (default). Моделирование в этом случае является полностью аналоговым. Для включения элементов неаналогового моделирования и вычисления вкладов на построенных траекториях необходимо создавать файлы типа complex. О дополнительной информации для этих файлов данных см. ниже. Примеры файлов simple – файлы: exampl1 – exampl6.

---

#### ОДИНАКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ФАЙЛОВ SIMPLE & COMPLEX

---

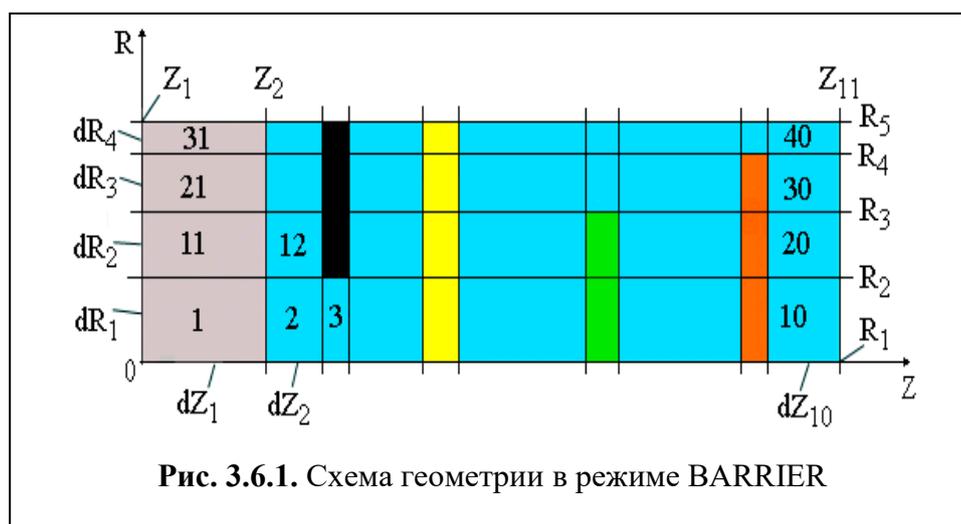
- 1) [exam1\_6.fce]– имя файла, рассчитанного программой CONST, с расширением "fce" (см. режим CONST).
- 2) [TITLE:...]- краткое описание файла (до 80 символов).
- 3) [10,4...!LZ,LR] LZ– число зон по Z (max 100), LR– по R (max 100), на которые разбит поглотитель (барьер). Здесь это 10 зон по Z и 4 по R.

*Барьер имеет вид цилиндра, разделенного на зоны по Z и по R, состоящие из одного вещества. Границы каждого вещества по R продолжаются через все*

зоны по  $Z$ , также как границы каждого вещества по  $Z$  продолжаются через все зоны по  $R$ .

При этом возможно образование соприкасающихся зон из одного вещества. Номера зон увеличиваются последовательно слева направо и снизу вверх, начиная с зон, примыкающих к оси цилиндра.

Схема построения геометрии для файла `exatpl_3` (не в масштабе) показана на рис. 3.6.1. Изображена только верхняя часть цилиндра. Цифры показывают номера зон.



- 4) [5.,2.,0.1,3.,0.5,5.,0.2,5.,0.2,3. !dZ]– толщины всех зон по  $Z$ (см).
- 5) [10.,1.,2.,3. !dR]– размеры всех зон по  $R$ (см).
- 6) [2,1,1,1,6,1,4,1,3,1] !NBZ (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)  
 [2,1,1,1,6,1,4,1,3,1] (11,12,13,14,...)  
 [2,1,5,1,6,1,1,1,3,1] (21,22,.....)  
 [2,1,5,1,6,1,1,1,1,1] (31,32,.....). –  
 номера веществ в каждой зоне. Удобно каждый слой по  $R$  располагать в отдельной строке. Рядом в круглых скобках показаны соответствующие номера зон.
- 7) [1 !NBZ\_NO] – номер вещества, которое не надо изображать на рисунке поглотителя в геометриях 3 и 4 (когда есть зоны и по  $Z$  и по  $R$ ). В этом случае 3-х мерный рисунок выглядит более подробно. Указывайте номер вещества, в котором находятся элементы конструкции поглотителя (например, воздух). Задайте 0, если желаете рисовать все вещества.
- 8) [0.,2.,5.,6.,7.,.../ !ZRI()]– значения границ (см) для рассчитываемых интегральных характеристик поля излучения(мах 100) от 0 до  $Z_{max}$ . Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

Это условные границы по  $Z$  внутри поглотителя в любом месте. При их пересечении частицей вычисляются интегральные характеристики. Интегральные– это зависимости только от  $Z$  барьера, например, коэффициенты пропускания, распределение по  $Z$  поглощенной энергии.

- 9) [3 !NZRD] – число границ для вычисления дифференциальных характеристик за барьерами определенной толщины (мах 9). Дифференциальные это характеристики, зависящие от энергии, направления, радиуса.

*Это границы по Z внутри поглотителя (условные) в любом месте. При их пересечении частицей вычисляются ее угловое, энергетическое и радиальное распределения. Их расчет ведется в барьерной геометрии. Это означает, что вклады вычисляются только при первом пересечении частицей границы барьера в направлении вперед (угол относительно оси Z от 0 до 90 град.)*

10) [10.6,15.8,21. !ZRD] – значения этих границ (см) в интервале от 0 до Zmax.

11) [0 !NALB] – признак вычисления дифференциальных характеристик альбедо. -1 не вычисляются, 0 – вычисляются от всей толщины барьера, I – вычисляются от части барьера  $Z_{min} = 0$ ,  $Z_{max} = ZRD(I)$ .  $I \leq NZRD$ . Интегральные характеристики альбедо вычисляются всегда.

*Следующие далее границы для спектров, угловых, радиальных и временных распределений задаются, если  $NZRD > 0$  или  $NALB \geq 0$ .*

12) [0,0.01,0.025 !NFE,Emin,dE] NFE – число интервалов гистограммы спектров ТИ. Если NFE=0, то значения энергий спектров вводятся вручную (см. (13)). Если  $NFE > 0$  ( $max = 399$ ), то значения энергетических границ задает программа, используя NFE, Emin(МэВ) – минимальная энергия спектра и dE (МэВ) – ширина интервала. Во втором случае ширина всех интервалов спектра одинакова.

*Первое значение энергии в спектре всегда = 0. Наибольшее должно быть не менее максимальной кинетической энергии электронов. Для позитронов при аннигиляции на лету возможно появление аннигиляционных гамма-квантов с энергией больше кинетической энергии позитронов.*

13) [0.,.005,.006,.008,.../ !FE()] – значения границ (МэВ) энергетических интервалов гистограммы для спектров ( $max=401$ ). Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

*Это ручной ввод энергий спектра. Он должен присутствовать только, если  $NFE = 0$  (см. 12). Значения возрастают от 0 до Emax. Emax не менее энергии источника. Энергии задаются произвольно, нужно выделять необходимые области в спектре (например для энергий ХРИ с K и L оболочек). В области тах спектра (обычно здесь он быстро меняется) границы надо делать чаще. Следует проводить предварительный расчет и по его результатам уточнять границы. Это относится ко всем дифференциальным характеристикам (угловому и радиальному распределениям).*

14) [0,30.0,35.0 ! NPSP\_T,T1\_SP,T2\_SP] NPSP\_T – признак вычисления спектра в заданном направлении (в некотором интервале полярного угла  $\vartheta$ ): 0 – спектр НЕ ВЫЧИСЛЯЕТСЯ, 1 – ВЫЧИСЛЯЕТСЯ; T1\_SP, T2\_SP – границы (град) угла  $\vartheta$  относительно оси Z, внутри которых вычисляется спектр.

*Следует иметь в виду, что при вычислении этих спектров происходит статистическое усреднение по азимутальному углу  $\phi$ , поэтому их следует вычислять лишь при нормальном падении первичных частиц на барьер. В этом случае число частиц, вылетающих под различными углами  $\phi$ , одинаково.*

15) [0.,5.,10.,15.,.../ !FT()]- значения границ интервалов гистограммы угловых распределений в градусах ( $max=101$ ). Начинаются с 0 и возрастают до угла не менее 90 гр. Значения произвольные, могут быть дробными. Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

- 16) [.0,.5,1.,2.,3.,.../ !FR()]- значения границ (см) интервалов гистограммы радиальных распределений (max=101). Начинаются с 0 и возрастают до значения не менее, чем радиус всего барьера. Этот массив должен заканчиваться слешем (/).
- 17) [.0,.01,.02,.../ !FTT()]- значения границ (нс) интервалов гистограммы временных распределений (max = 101). Начинаются с 0. Этот массив должен заканчиваться слешем (/).
- 18) [3 !NSTR] – признак вычисления интегральных и дифференциальных характеристик за барьерами только в интервале по R от 0 до R(NSTR). При NSTR = 0 от 0 до Rmax. NSTR = I < LR ! В данном случае все результаты будут вычисляться в пределах первых I зон по R. В заданном примере в пределах первых 3-х зон по R, т.е. от 0 до 10+1+2=13см.
- 19) [1 !NPE] – признак вычисления дифференциальных характеристик электронов. 1 – вычислять; 0 – нет.
- 20) [1 !NPG] – признак вычисления дифференциальных характеристик фотонов 1 – вычислять; 0 – нет.
- 21) [0 !NPOZ] – признак вычисления дифференциальных характеристик позитронов. 1 – вычислять; 0 – нет.
- 22) [0 !NPROT] – признак вычисления дифференциальных характеристик протонов. 1 – вычислять; 0 – нет.
- 23) [0 !PR\_FIELD] – признак наличия внешнего электрического и магнитного поля: 0 – поля нет; 1 – поле есть.

*Если в некоторых (или во всех) зонах имеется внешнее поле, то необходимо вводить дополнительную информацию. Рассмотрим это на примере файла exampl\_2.de2:*

```

1                ! PR_FIELD (поле есть)
1                ! NZ
1,0.0,0.0,-0.050 ! NCP,Ex,Ey,Ez (МВ/см)
1                ! NZ
2,0.5,-0.5,0.0  ! NCP,Bx,By,Ez (Тл)
0                ! NZ=0 (End)

```

23а) [1 !NZ] – номер зоны с полем.

23б) [1,0.0,0.0,-0.05 !NCP,Ex,Ey,Ez (МВ/см)]

NCP– тип поля: 1– электрическое; 2– магнитное.

Ex,Ey,Ez– проекции вектора электрического поля (МВ/см).

23в) [1 !NZ] – номер зоны с полем (в зоне могут быть оба типа поля).

23г) [2,.5d0,-.5d0,0.d0 !NCP,Bx,By,Ez (Тл)]

Bx,By,Ez– проекции вектора магнитного поля (Тесла).

23д) [0 !NZ=0 (End)] – так заканчивается ввод данных поля.

24) [99999999 !NISTM] – максимальное число историй (любое число, max 7 позиций).

25) [100000 !NIST\_PR] – число историй, после моделирования которых происходят периодические промежуточные выдачи результатов расчета в специальный файл (res\_prom.re2).

26) [1000 !NTR] – число историй, при расчете которых траектории частиц строятся на экране.

27) [1 !ITZAD] – время задержки перед построением очередного элемента траектории частиц (мсек). 0 – нет задержки.

*ВНИМАНИЕ! Моделирование с построением траекторий частиц на экране (особенно с использованием задержки) выполняется намного медленнее, чем без построения.*

28) [3,7,6,19,0,14 !NCFIG] – номера цвета веществ, которыми они отображаются на экране. Их количество должно быть не менее числа веществ, для которых рассчитан файл констант с расширением "fse" программой CONST (см. режим CONST). Цвета и их номера можно увидеть через раздел меню "**Palette**".

*Для файлов типа **complex** необходимо ввести дополнительную информацию. Далее на примере файлов: *exampl\_8.de2* и *exampl\_9.de2*.*

а) [0,75 !DSMPER] – коэффициент, который позволяет уменьшать величину отрезка траектории заряженных частиц при пересечении границы зоны. Это позволяет более точно рассчитывать характеристики поля излучения вблизи границы раздела сред.  $0.25 \leq \text{DSMPER} \leq 1$ . **Уменьшение DSMPER увеличивает время счета.**

б) [1 !NEPG] – признак поглощения фотонов при  $E < E_{\text{min}}$  (0 – нет, 1 – да). Если 1, то оставшаяся энергия фотона добавляется к поглощенной энергии.

в) [1,0 !NIEK,NKMTD] – признак (NIEK) и метод (NKMTD) ионизации К-оболочки электронами (позитронами). NIEK = 0 – нет, 1 – да. NKMTD=0 – аналоговый, 1 – аналитическое усреднение (**неаналоговое моделирование траектории**).

г) [1,0 !NIEL,NLMTD] – то же для L-оболочки электронами (позитронами).

д) [0,0 !NIEK\_PR,NKMTD\_PR] – аналогично (г), но для протонов.

е) [0,0 !NIEL\_PR,NLMTD\_PR] – аналогично (д), но для протонов.

ж) [0,1,.5,.1 !MDE,NMDE,EMDE,ZRM\_E] MDE – количество электронов (позитронов) при ветвлении (расщеплении) их траектории.  $MDE \geq 0$ . Если MDE = 0, нет расщепления. MDE > 0 это **неаналоговое моделирование траектории**. Увеличение MDE увеличивает время счета. NMDE – признак расщепления: 1 – только для частиц, которые движутся вперед, 2 – только назад, 3 – все. EMDE – минимальная энергия (МэВ), до которой проводится расщепление. ZRM\_E – граница ветвления по Z (см) Ветвление происходит в области  $Z > \text{ZRM}_E$ .

з) [1,1,.2,.5 !MDG,NMDG,EMDG,ZRM\_G] – аналогично для фотонов.

*Если частица появилась в результате расщепления (или ее траектория расщеплялась), то больше в расщеплении она не участвует.*

и) [1 !NFOT] – признак аналитического усреднения фотоэффекта (поглощения фотона): 0 – нет, 1 – только для фотонов летящих вперед, 2 – только назад, 3 – для всех.

к) [1,1,.5 !NTORM,ETORM,WR\_MAX] NTORM – признак увеличения выхода тормозного излучения (ТИ): 0 – нет, 1 – только для электронов (позитронов), движущихся вперед, 2 – только назад, 3 – для всех; ETORM – энергия (МэВ) электронов и позитронов, выше которой будет использоваться этот метод ( $\text{ETORM} < E$  источника); WR\_MAX – коэффициент увеличения сечения ТИ  $1 < \text{WR\_MAX} \leq 10$ .

л) [n !NANNIH] – признак учета аннигиляции на лету:  $n=0$  -аналоговое моделирование аннигиляции на лету;  $n=1$  – неаналоговое моделирование (аннигиляция происходит в каждой точке столкновения позитрона с соответствующим весом);  $n=2$  -отключение аннигиляции на лету.

м) [2 !NZON]– число зон( $\max=200$ ), в которых применяется аналитическое усреднение поглощенной энергии фотонов (**неаналоговое вычисление поглощенной энергии от фотонов**). 0– нет аналитического усреднения.

н) [2,4 !NZPR()]–номера зон, в которых есть аналитическое усреднение. Если NZON=0, то этой строки нет.

о) [0 !NZVR]– число зон (слоев) по Z, в которых применяется вынужденное рассеяние фотонов для вычисления поглощенной энергии (**неаналоговое моделирование траектории**).

*Если NZVR > 0, то далее следует строка с номерами зон. Вынужденное рассеяние применять только для барьеров с LR=1 (см. (4) ). НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ одновременно аналитическое усреднение и вынужденное рассеяние!*

п) [1,0.5d0 !NOAN,IZ\_NOAN,A\_NOAN]NOAN– признак: 0–аналоговое моделирование свободного пробега фотонов, 1– неаналоговое моделирование свободного пробега фотонов (**неаналоговое моделирование траектории**); IZ\_NOAN – номер зоны по Z, где метод используется; A\_NOAN – коэффициент изменения сечения  $0 < A\_NOAN \leq 0.9$ .

Этот метод позволяет получить результат с меньшей статистической погрешностью и за меньшее время на большом удалении от источника фотонов. Например, рассчитать зависимость дозы за барьером от фотонов для больших толщин барьера.

*ПРИМЕНЯТЬ ТОЛЬКО ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПО Z И R СЛОЯ БАРЬЕРА  
НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ВМЕСТЕ С ВЫНУЖДЕННЫМ РАССЕЯНИЕМ  
НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ВМЕСТЕ С АНАЛИТИЧЕСКИМ УСРЕДНЕНИЕМ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ*

р) [1.0d-15 !QGR]– min вес частиц, до кот-го строятся их траектории.  $0 < QGR < 1$ . Заканчиваться траектория частицы может как по достижении минимальной энергии, так и по достижении минимального веса QGR.

Единственный недостаток метода Монте-Карло – медленная сходимость, которая не позволяет использовать **аналоговое** (имитационное, примитивное) моделирование для оценки событий, имеющих очень малую вероятность. Для этих целей применяют разнообразные способы **неаналогового моделирования траектории** и **неаналогового вычисления вкладов** на построенных траекториях, использующие так называемые веса. Чтобы свободно задавать параметры пунктов (г)–(р) необходимо:

- представлять, что такое неаналоговое моделирование (см., например, И.М. Соболев Метод Монте-Карло/ Популярные лекции по математике, М.: Наука, 1985; И.М. Соболев Численные методы Монте-Карло – М.: Наука, 1973; А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин Введение в теорию прохождения частиц через вещество – М.: Атомиздат, 1978; А.М. Кольчужкин, А.В. Богданов Метод Монте Карло в теории переноса излучений – Томск: Изд-во ТПУ, 2006);
- экспериментировать и приобретать опыт.

29) [ist3g ! nameist]– начало ввода характеристик источника. Структуру этих данных см. раздел 3.6.4.

**Файл exampl\_1.de2**

ЗАДАЧА: Простой однородный барьер из воды, на который нормально падает тонкий ( $R=0$ ) пучок электронов с энергией 6 МэВ.

**Файл exampl\_2.de2**

ЗАДАЧА: Однородный барьер из воздуха, в котором присутствует электрическое и магнитное поле. Спектр и угловое распределение электронов заданы в виде функций.

**Файл exampl\_4.de2**

ЗАДАЧА: Барьер неоднородный только по  $Z$ . Изотропный источник фотонов с энергией 1,25 МэВ.

**Файл exampl\_5.de2**

ЗАДАЧА: Барьер неоднородный только по  $R$ . Коллимированный источник тормозного излучения.

**Файл exampl\_6.de2**

ЗАДАЧА: Сложный барьер, неоднородный по  $Z$  и  $R$ . В некоторых зонах барьера есть электрическое и магнитное поле. Источник изотропный из 2-х радионуклидов: Co-60 + Cs-137.

**Файл exampl\_7.de2**

ЗАДАЧА: Тонкий по  $R$  и длинный по  $Z$  барьер из воды. Источник электронов с энергией 1000 МэВ.

**Файл exampl\_8.de2**

ЗАДАЧА: Пример данных типа complex с элементами неаналогового моделирования.

**Файл exampl\_9.de2**

ЗАДАЧА: Пример данных типа complex (глубокое проникновение). Тормозное излучение с максимальной энергией 15 МэВ падает на слой бетона толщиной 400 см. Неаналоговое моделирование свободного пробега фотонов.

**Файл exampl\_10.de2**

ЗАДАЧА: Пример данных типа complex. Слой воздух толщиной 20 м. В нем изотропный радионуклидный источник с неоднородным распределением по  $Z$ .

**Файл exampl\_11.de2**

ЗАДАЧА: Пример формирования однородного по  $R$  электронного пучка для лучевой терапии. Первичный пучок электронов с энергией 8 МэВ и диаметром 5 мм системой рассеивающих фольг и коллиматоров превращается в однородный по  $R$  пучок диаметром 80 мм.

**Файл exampl\_12.de2**

ЗАДАЧА: На однородный барьер из  $Cu$  падает нормально узкий пучок позитронов с кинетической энергией 6 МэВ. Рассчитывается спектр тормозного и аннигиляционного излучения, выходящего из барьера. Значения границ интервалов спектра задаются программой через число интервалов и их ширину. Вычисляется спектр в заданном направлении, в интервале углов 30–35 град.

### 3.6.4. Структура данных для источников

Режим BARRIER позволяет работать с несколькими типами источников. Ниже даны характеристики источников и порядок ввода данных для них.

#### *IST – моноэнергетический источник*

===== (на примере файла exampl\_1.de2) =====

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST (вводится всегда):

ist	! nameist
0	! NGIST
0	! NUIST
1	! NPO
6.d0	! E0
0.d0,0.d0	! $\vartheta$ , $\varphi$
0.d0,0.d0,0.d0	! X0, Y0, Z0
1.d0	! Q0
0.0	! RIS

- =====
- 1) [ist !nameist]– имя источника;
  - 2) [0 !NGIST]– тип геометрии (пространственного распределения) источника:
    - 0 – точечный (X0,Y0,Z0);
    - 1 – плоский равномерный по R (от R=0 до R=RIS – радиус источника);
    - 2 – плоский дисковый нормальный от R=0 до RIS,  $\langle R \rangle = 0$ ;

=====

**ВНИМАНИЕ!** Для 1 и 2 координаты частиц разыгрываются в пл. перпендикулярной вектору, направление которого определяется углами  $\vartheta$  (полярный) и  $\varphi$  (азимутальный), а начало вектора координатами X0, Y0, Z0. Положительное направление углов  $\vartheta$  и  $\varphi$  – против часовой стрелки. Сначала поворот на  $\vartheta$  вокруг Y, затем на  $\varphi$  вокруг Z. Используется правосторонняя система координат. Сначала розыгрыш X, Y выполняется в пл. XY (Z=0), затем проводится пересчет координат:

$$X1 = X \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) - Y \cdot \cos(\vartheta) \cdot \sin(\varphi) + X0$$

$$Y1 = X \cdot \sin(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) + Y \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi) + Y0$$

$$Z1 = -X \cdot \sin(\vartheta) \cdot \sin(\varphi) + Y \cdot \sin(\vartheta) \cdot \sin(\varphi) + Z0$$

- =====
- 3 – все частицы испускаются с окружности R = RIS;
  - 4 – многокольцевой (Rmax = RIS, Max = 9 колец);
  - 5 – цилиндрический внутренний (ZN–ZK; 0–R=RIS);
  - 6 – объемный кольцевой внутренний (ZN–ZK; R1–R2).
- 3) [0 !NUIST]- характер углового распределения источника:
    - 0– мононаправленный. Задается углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.) вектора направления частиц относительно осей OZ и OX. Программа сама рассчитывает начальные проекции вектора: WX0, WY0, WZ0.

$$WX0 = \sin\vartheta \cdot \cos\varphi,$$

$$WY0 = \sin\vartheta \cdot \sin\varphi,$$

$$WZ0 = \cos\vartheta.$$

1 – изотропный в конусе с раствором UGR (половина угла при вершине конуса). Направление оси конуса определяется углами  $\vartheta$  и  $\varphi$ , а начало координатами  $X_0, Y_0, Z_0$ ;

*Если задать UGR=180гр., то получим источник, изотропный во все пространство.*

2 – угловое распределение источника  $f(u) = \cos(u)$ .

4) [1 !NP0]– тип частиц, испускаемых источником:

0– фотоны;

1– электроны;

2– позитроны;

3– протоны.

5) [6.d0 !E0]– начальная энергия частиц источника (МэВ).  $E_{\min} < E_0 < E_{\max}$ .  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  см. режим CONST.

6) [0.d0,0.d0 !tet,fi] – углы (град.) вектора направления частиц источника относительно осей OZ и OX.

7) [0.d0,0.d0,0.d0 !X0,Y0,Z0]- начальные координаты частиц (см).

8) [1.d0 !Q0]- начальный вес частиц.

9) [0.0 !RIS]- радиус источника (см).

*ВНИМАНИЕ! Не вся основная информация используется у всех источников.*

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST

##### I) ГЕОМЕТРИЯ

1) если NGIST = 2

у этого источника  $\langle R \rangle = 0$  и надо задать среднеквадратическое отклонение (SIGM в см).

2) если NGIST = 4

надо задать:

а) NKOL– число колец (max=9),

б) радиусы колец в см (их число = NKOL+1, R1=0),

в) признаки колец (0– из этого кольца (от  $R_i$  до  $R_{i+1}$ ) частицы не испускаются, 1– испускаются).

Программа вычисляет вероятности испускания частицы из каждого кольца.

3) если NGIST = 5, то надо задать:

а) ZN– начало

б) ZK– конец источника по оси OZ в см.

По радиусу частицы распределены от 0 до RIS.

4) если NGIST = 6

надо задать:

а) ZN, ZK– начало и конец источника по оси OZ в см.

б) R1, R2– минимальный и максимальный радиусы источника в см (см. файл данных exampl\_4.de2).

##### II) УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

если NUIST = 1,

надо задать половину угла UGR при вершине конуса в град. (см. файлы данных exampl\_2.de2, exampl\_4.de2).

### ***IST1 – квазимоноэнергетический источник***

Энергии частиц распределены по нормальному закону относительно средней энергии. Разброс задается полушириной распределения.

ВСЕ ОСТАЛЬНОЕ КАК У IST

===== (пример на основе IST) =====

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST1 (вводится всегда):

ist1	! nameist
0	! NGIST
0	! NUIST
1	! NP0
6.d0	! E0
0.6d0	! FWHM
0.d0,0.d0	! $\vartheta$ , $\varphi$
0.d0,0.d0,0.d0	! X0, Y0, Z0
1.d0	! Q0
0.0	! RIS

6) [0.6d0 !FWHM] – полуширина энергетического распределения источника (МэВ) (full width at half maximum). Это единственное отличие от ist. Если FWHM=0, то IST1 моноэнергетический источник.

### ***IST3 – сплошной спектр (функция)***

===== (на примере файла exampl\_2.de2) =====

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST3 (вводится всегда)

ist3	! nameist
1	! NGIST
3	! NUIST
1	! NP0
1.d0	! E0
0.d0,0.d0	! $\theta$ , $\phi$
0.d0,0.d0,0.d0	! X0, Y0, Z0
1.d0	! Q0
0.0	! RIS
11	! NES
0.5,0.6,0.8,1.,1.2,1.4,1.6,1.8,2.,2.5,3.	! EISS(I)
0.1,0.2,0.3,0.5,0.7,0.9,1.,1.1,1.,0.8,0.6	! FPS(I)
0	! NSW

1) [ist3 !nameist]– имя источника;

2) [1 !NGIST]– тип геометрии (пространственного распределения) источника:  
0– точечный (X0,Y0,Z0);

1 – плоский дисковый равномерный (от R=0 до R=RIS – радиус источника);

2 – плоский дисковый нормальный от R=0 до RIS,  $\langle R \rangle = 0$ .;

**ВНИМАНИЕ!** Для 1 и 2 координаты частиц разыгрываются в пл., перпендикулярной вектору, направление которого определяется полярным углом  $\vartheta$

и азимутальным  $\varphi$ , а начало вектора координатами  $X_0, Y_0, Z_0$ . Положительное направление углов  $\vartheta$  и  $\varphi$  – против часовой стрелки.

3– объемный кольцевой внутренний ( $Z_N-Z_K; R_1-R_2$ ).

3) [3 !NUIST]– характер углового распределения источника:

0– мононаправленный. Задается углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.) вектора направления частиц относительно осей OZ и OX. Программа сама рассчитывает начальные проекции вектора:  $WX_0, WY_0, WZ_0$ .

$$WX_0 = \sin\vartheta * \cos\varphi,$$

$$WY_0 = \sin\vartheta * \sin\varphi,$$

$$WZ_0 = \cos\vartheta.$$

1 – изотропный в конусе с раствором UGR (половина угла при вершине конуса). Направление оси конуса определяется углами  $\vartheta, \varphi$ , а начало координатами  $X_0, Y_0, Z_0$ ;

**ВНИМАНИЕ!** Если задать  $UGR=180$ гр., то получим источник, изотропный во все пространство.

2 – угловое распределение источника  $f(u) = \cos(u)$ .

3– функция углового распределения источника задается. Программа сама проводит нормировку и вычисляет плотность и функцию распределения.

4) [1 !NP0]– тип частиц, испускаемых источником:

0– фотоны;

1– электроны;

2– позитроны;

3– протоны.

5) [1.d0 !E0]– начальная энергия частиц источника (МэВ).

6) [0.d0,0.d0 !teta,fi]– углы (град.) вектора направления частиц источника относительно осей OZ и OX.

7) [0.d0,0.d0,0.d0 !X0,Y0,Z0]– начальные координаты частиц (см).

8) [1.d0 !Q0]– начальный вес частиц.

9) [0.0 !RIS]– радиус источника (см).

10) [11 !NES]– число точек в спектре источника (MAX = 100).

11) [0.5,0.6,0.8,... !EISS(I)]– значения энергий E (МэВ).

12) [0.1,0.2,0.3,... !FPS(I)]– значения  $f(E)$ .

13) [0 !NSW]– признак: 0– аналоговое моделирование энергии частиц источника (в соответствии с функцией распределения),

NSW=1 – неаналоговое моделирование спектра из равномерного распределения с весом.

NSW=2 – неаналоговое из экспоненциального распределения с весом:

$$g(E)=1/(DE*S)*EXP(-a*E); \quad DE=E_{\max}-E_{\min}; \quad S = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{\exp(-aE)}{DE} dE E);$$

$S=(EXP(-a*E_{\min})-EXP(-a*E_{\max}))/(DE*a)$ ; вес  $w(E)=f(E)/g(E)$ , где  $f(E)$  – плотность распределения заданного спектра (вычисляется по введенному распределению);  $w(E)= f(E)*DE*S/EXP(-a*E)$ ;  $a > 0$ .

Позволяет увеличить выход высокоэнергетической части быстро

спадающего спектра.

БОЛЬШОЙ КОЭФФИЦИЕНТ  $a$  ПРИВОДИТ К БОЛЬШИМ ВЕСАМ И ФЛУКТУАЦИЯМ. ПРОВЕРЯЙТЕ. РЕКОМЕНДУЮ:  $0 < a < 2$ .

14) ТОЛЬКО ДЛЯ NSW=2!

Вводится коэффициент  $a$  (ANSW2).

*Не вся основная информация используется у всех источников.*

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST3

I) ГЕОМЕТРИЯ

1) если NGIST = 2

у этого источника  $\langle R \rangle = 0$  и надо задать среднеквадратическое отклонение (SIGM в см).

2) если NGIST=3, то надо задать:

а) ZN, ZK– начало и конец источника по оси OZ в см.

б) R1, R2– минимальный и максимальный радиусы источника в см (см. файл данных exampl\_3.de2).

II) УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

1) если NUIST = 1

надо задать половину угла UGR при вершине конуса в град.  $0 < UGR \leq 180$  град. Источник может быть изотропным во все пространство (см. файл данных exampl\_4.de2).

2) если NUIST = 3

надо задать:

а) NFFT– число точек углового распределения источника (MAX = 100). [11 !NFFT]– так задано число точек.

б) FCT(I)– значения улов  $u$  (град.). [0.,1.,2.,3.,4.,5.,6.,8.,10.,12.,15.]– так заданы  $u$ .

в) FFT(I)– значения  $f(u)$ . [0.1,0.5,1.,1.5,2.5,3.,2.5,1.5,1.,0.5,0.1]–так задана  $f(u)$ .

**IST3G – сплошной спектр (гистограмма)**

===== (на примере файла exampl\_3.de2) =====

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST3G (вводится всегда)

```
ist3g                ! nameist
3                    ! NGIST
2                    ! NUIST
0                    ! NP0
1.d0                 ! E0
0.d0,0.d0           ! teta,fi
0.d0,0.d0,0.d0      ! X0,Y0,Z0
1.d0                 ! Q0
0.0                  ! RIS
33                   ! NES
.005,.01,.015,.02,.025,.03,.035,.04,.045,.05,.055,.05883,.05884,
.062,.065,.06756,.06757,.07,.075,.08,.085,.09,.095,.1,.105,.11,
.115,.12,.125,.13,.135,.14,.145,.15
```

.664E-05,.782E-03,.00805,.0159,.0199,.0218,.021,.0192,.0166,  
.0157,.0155,13.3,.0122,.011,.0106,3.56,.00955,.00792,.00695,  
.00587,.0052,.00454,.0038,.00328,.00311,.00252,.00205,.00183,  
.00131,.0011,.000803,.000399,.000114

0 ! NSW  
0 ! NQ0

1) [ist3g !nameist]– имя источника;

2) [3 !NGIST]– тип геометрии (пространственного распределения) источника:

0– точечный (X0, Y0, Z0);

1 – плоский равномерный по R (от R=0 до R=RIS – радиус источника);

2 – плоский дисковый нормальный от R=0 до RIS, <R>=0.;

*Для 1 и 2 координаты частиц разыгрываются в пл., перпендикулярной вектору, направление которого определяется углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.), а начало вектора координатами X0,Y0,Z0. Положительное направление углов  $\vartheta$  и  $\varphi$  – против часовой стрелки.*

3– объемный кольцевой внутренний (ZN–ZK; R1–R2).

3) [2 !NUIST]– характер углового распределения источника:

0– мононаправленный. Задается углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.) вектора направления частиц относительно осей OZ и OX. Программа рассчитывает затем начальные проекции вектора: WX0, WY0, WZ0.

$$WX0 = \sin\vartheta * \cos\varphi,$$

$$WY0 = \sin\vartheta * \sin\varphi,$$

$$WZ0 = \cos\vartheta.$$

1 – изотропный в конусе с раствором UGR (половина угла при вершине конуса). Направление оси конуса определяется углами  $\vartheta$ ,  $\varphi$ , а начало координатами X0,Y0,Z0;

*Если задать UGR=180 гр., то получим источник, изотропный во все пространство.*

2 – гистограмма углового распределения источника задается. Программа проводит нормировку и вычисляет плотность и функцию распределения.

4) [0 !NP0]– тип частиц, испускаемых источником:

0 – фотоны;

1 – электроны;

2 – позитроны;

3 – протоны.

5) [1.d0 !E0] – начальная энергия частиц источника (МэВ).

6) [0.d0,0.d0 ! $\vartheta$ ,  $\varphi$ ]– углы (град.) вектора направления частиц источника относительно осей OZ и OX.

7) [0.d0,0.d0,0.d0 !X0,Y0,Z0]– начальные координаты частиц (см).

8) [1.d0 !Q0] – начальный вес частиц.

9) [0.0 !RIS] – радиус источника (см).

10) [11 !NES] – число интервалов гистограммы спектра источника g(E) (MAX = 99).

- 11) [0.5,0.6,0.8,...] – значения энергий E(МэВ) (MAX = 100).
- 12) [0.1,0.2,0.3,...] – значения g(E) (MAX = 99).
- 13) [0 !NSW] – признак: 0– аналоговое моделирование энергии (в соответствии с функцией распределения), 1– неаналоговое (из равномерного распределения с весом).
- 14) [0 !NQ0] – признак веса источника:  
NQ0 = 0, начальный вес частиц источника вводит IST3G (Q0),  
NQ0 = 1, вычисляет IST3G при нормировке заданного спектра.

*Не вся основная информация используется у всех источников.*

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST3G

##### I) ГЕОМЕТРИЯ

- 1) если NGIST = 2  
у этого источника  $\langle R \rangle = 0$  и надо задать среднеквадратическое отклонение (SIGM в см).
- 2) если NGIST=3  
надо задать:  
а) ZN, ZK – начало и конец источника по оси OZ в см. Задано: 0.5, 0.6;  
б) R1, R2 – минимальный и максимальный радиусы источника в см. Задано: 3.0, 4.0

##### II) УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

- 1) если NUIST = 1  
надо задать половину угла UGR при вершине конуса в град.  
 $0 < UGR \leq 180$  град. и источник может быть изотропным во все пространство (см. файл данных exampl\_4.de2).
- 2) если NUIST=2  
надо задать:  
а) NFFT – число интервалов гистограммы углового распределения источника g(u) (MAX = 99). Задано: 11.  
б) Значения улов u (град.). Задано: 0.,1.,2.,3.,4.,5.,6.,8.,10.,12.,14.,16.  
в) значения f(u). Задано: 0.1,0.5,1.,1.5,2.5,3.,2.5,2.3,2.0,1.5,1.0,0.5

#### ***IST\_RAD – радионуклидный источник***

(на примере файла exampl\_6.de2)

При моделировании этого источника используется база данных (txt–файл) ist\_rad.dat, который находится в папке ... \PCLAB

#### ***Как происходит розыгрыш, и какие излучения учитываются?***

- 1) В соответствии с вкладом в активность разыгрывается тип р/нуклида. Максимальное число р/нукл. в источнике = 20.
- 2) Если есть бета– излучение, разыгрывается энергия электрона из спектра бета–излучения с весом = квантовому выходу бета– распада. При вводе данных р/нукл источник готовит соответствующую функцию распределения.
- 3) Последовательно моделируются все гамма–линии р/нукл, которые есть в базе (max = 30), с весами = квантовым выходом линий (если есть гамма–излучение).

4) Последовательно моделируются все линии характеристического излучения (ХРИ) р/нукл, связанные с перестройкой электронной оболочки, которые есть в базе (max = 20), с весами = квантовым выходам линий (если есть ХРИ).

Для ГАММА и ХРИ не учитываются энергии менее 1 кэВ.

5) Последовательно моделируются все альфа линии р/нукл, которые есть в базе (max = 10), с весами = квантовым выходам линий (если есть альфа излучение).

*Траектории альфа-частиц в режиме BARRIER не моделируются. Они поглощаются в точке рождения и дают вклад лишь в поглощенную энергию.*

6) Последовательно моделируются все электронные линии р/нукл, связанные с электронами внутренней конверсии (ICE) и Оже-электронами (AG) (max = 20) с весами = квант. выходу линий (если есть эти излучения).

7) Если есть бета+ излучение, разыгрывается энергия позитрона из спектра бета+ излучения с весом = квант. выходу бета+ распада. При вводе данных р/нукл источник готовит соответствующую функцию распределения.

*ВСЕ ЭТО МОДЕЛИРУЕТСЯ В РАСЧЕТЕ НА 1 РАСПАД ЯДРА, т.е.*

*2)+3)+4)+5)+6)+7) = 1-му распаду р/нукл и нормировка расчета на 1-ую историю равна нормировке на 1 распад.*

Излучение р/нукл может быть задано с учетом излучения дочерних продуктов распада. В этом случае из базы (см. файл ist\_rad.dat) берется суммарное излучение всех р/нукл (и бета-спектров также). Аннигиляционное излучение учитывается автоматически при моделировании траекторий позитронов.

В txt-файле базы данных (ist\_rad.dat) находится информация о нескольких р/нукл. Но в начале файла описан его формат, что позволяет любому пользователю дополнить базу другими р/нукл (или внести исправления и дополнения в имеющиеся данные). Там же приведены ссылки на базы данных, где есть необходимая информация.

===== далее на примере файла exampl\_6.de2) =====

ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ГЕОМЕТРИИ И УГЛОВОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИСТОЧНИКА IST\_RAD (вводится всегда)

ist_rad	! nameist
2	! NGIST
1	! NUIST
0.d0,0.d0	! teta,fi
0.d0,0.d0,0.d0	! X0,Y0,Z0
1.d0	! Q0
0.0	! RIS

1) [ist\_rad !nameist]– имя источника;

2) [2 !NGIST]– тип геометрии (пространственного распределения) источника:

0– точечный (X0, Y0, Z0);

1 – плоский дисковый равномерный (от R=0 до R=RIS – радиус источника);

Координаты частиц разыгрываются в пл., перпендикулярной вектору, направление которого определяется углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.), а начало вектора координат

натами  $X_0, Y_0, Z_0$ . Положительное направление углов  $\vartheta, \varphi$  – против часовой стрелки.

2– объемный кольцевой (дисковый) равномерный ( $Z_N-Z_K; R_1-R_2$ ).

3– объемный кольцевой (дисковый) равномерный по  $R$  от  $R_1$  до  $R_2$ ; по  $Z$  неравномерный,  $z$  разыгрывается из функции  $f(z)$  от  $Z_N$  до  $Z_K$ . Функция  $f(z)$  источника задается. Программа сама проводит нормировку и вычисляет плотность и функцию распределения.

3) [1 !NUIST]- характер углового распределения источника:

0– мононаправленный. Задается углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.) вектора направления частиц относительно осей  $OZ$  и  $OX$ . Программа рассчитывает затем начальные проекции вектора:  $WX_0, WY_0, WZ_0$ .

$$WX_0 = \sin\vartheta \cdot \cos\varphi,$$

$$WY_0 = \sin\vartheta \cdot \sin\varphi,$$

$$WZ_0 = \cos\vartheta.$$

1 – изотропный в конусе с раствором  $UGR$  (половина угла при вершине конуса). Направление оси конуса определяется углами  $\vartheta, \varphi$ , а начало координатами  $X_0, Y_0, Z_0$ ;

*ВНИМАНИЕ! Если задать  $UGR=180$ гр., то получим источник, изотропный во все пространство.*

4) [0.d0,0.d0 !teta,fi]– углы (град.) вектора направления частиц источника относительно осей  $OZ$  и  $OX$ .

5) [0.d0,0.d0,0.d0 !X0,Y0,Z0]– начальные координаты частиц (см).

6) [1.d0 !Q0]– начальный вес частиц.

7) [0.0 !RIS]- радиус источника (см).

*Не вся основная информация используется у всех источников.*

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ГЕОМЕТРИИ И УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА IST\_RAD

### I) ГЕОМЕТРИЯ

1) если  $NGIST = 2$

надо задать:

а)  $R_1, R_2$ – минимальный и максимальный радиусы источника в см. Задано: 4.0, 6.0

б)  $Z_N, Z_K$ – начало и конец источника по оси  $OZ$  в см. Задано: 0.0, 1.0

2) если  $NGIST=3$

надо задать:

а)  $R_1, R_2$  – минимальный и максимальный радиусы источника в см.

б)  $Z_N, Z_K$  – начало и конец источника по оси  $OZ$  в см.

в)  $MZ$  – число точек в распределении  $f(z)$  источника ( $MAX=50$ ).

г)  $ZIST(i)$  – значения  $z$  (см) от  $Z_N$  до  $Z_K$ .

д)  $FZIST(i)$  – значения  $f(z)$ .

### II) УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

1) если  $NUIST = 1$

надо задать половину угла  $UGR$  при вершине конуса в град.

$0 < UGR \leq 180$  град. Источник может быть изотропным во все пространство.

- 2) NPR\_UG – признак моделирования углового распределения  
 0– аналоговое (равномерное по COS(u),  
 1– *неаналоговое* (больше частиц летит вперед). Работает при UGR>45гр.  
 Задано: 180.,0

ИНФОРМАЦИЯ О ИЗЛУЧЕНИИ ИСТОЧНИКА IST\_RAD (вводится всегда)

```
1,1,1,1,1,1      ! nr_gam,nr_xri,nr_alf,nr_bemi,nr_berl,nr_ice
0.               ! cng_min
0.               ! cnx_min
0.               ! sne_min
2                ! n_rad
Со-60            ! имя р/нукл
0.4              ! вклад в активность
Cs-137+          ! имя р/нукл
0.6              ! вклад в активность
```

- 1) [1,1,1,1,1,1 !nr\_gam,nr\_xri,nr\_alf,nr\_bemi,nr\_berl,nr\_ice]– признаки учета типов излучений (1– учитывать, 0– нет).  
 nr\_gam– ГАММА;  
 nr\_xri– ХРИ;  
 nr\_alf– АЛЬФА;  
 nr\_bemi– БЕТА(-);  
 nr\_berl– БЕТА(+);  
 nr\_ice– ICE+AG.
- 2) [0. !cng\_min] cng\_min– min кв. выход гамма-линии, с меньшим не учитываются. 0– учитываются все линии.
- 3) [0. !cnx\_min] cnx\_min– min кв. выход ХРИ-линии, с меньшим не учитываются. 0– учитываются все линии.
- 4) [0. !sne\_min] sne\_min– min отн. выход электронов внутренней конверсии и Оже-электронов, с меньшим не учитываются. 0– учитываются все линии.
- 5) [2 !n\_rad]– число р/нукл в источнике (MAX = 20).  
 Следующая информация описана во входных данных.  
 Суммарный вклад всех р/нукл в активность = 1.

**IST\_XRBR – источник рентгеновского (РИ) и тормозного (ТИ) излучения**  
 (на примере файла exampl\_5.de2)

Энергии фотонов разыгрываются только из определенного набора спектральных распределений, которые рассчитаны методом Монте-Карло:

РИ (XRAYs):  $U_{max}$  (kV) = 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400;

ТИ (BREMS):  $E_{max}$ (MeV) = 1, 3, 6, 10, 15, 30, 50, 100.

=====ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST\_XRBR (вводится всегда)=====

```
ist_xrbr        ! nameist
2                ! num_ist_e
3.0             ! Emax(Umax)
0               ! NSW
2                ! num_angl
```

0.d0,0.d0	! teta,fi
15.	! UGR
0.d0,0.d0,0.d0	! X0,Y0,Z0
1.d0	! Q0

- =====
- 1) [ist\_xrbr !nameist] – имя источника;
  - 2) [2 !num\_ist\_e] – тип спектра источника: 2– ТИ, 3– РИ;
  - 3) [3.0 !E<sub>max</sub>(U<sub>max</sub>)] – начальная энергия. Если источник с тормозным спектром, то это максимальная энергия спектра (E<sub>max</sub>) МэВ. Задавать только значения: 1.0, 3.0, 6.0, 10.0, 15.0, 30.0, 50.0, 100.0. Если источник с рентгеновским спектром, то это максимальное напряжение рентгеновской трубки (U<sub>max</sub>) кВ. Задавать только значения: 75., 100., 150., 200., 250., 300., 350., 400.
  - 4) [0 !NSW]– способ розыгрыша энергии фотона: 0– аналоговый (в соответствии с функцией распределения), 1– неаналоговый (из равномерного распределения с весом). NSW = 1 это *неаналоговое моделирование энергии источника*.
  - 5) [2 !num\_angl] – характер углового распределения источника:
    - 1 – мононаправленный. Задается углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (град.) вектора направления частиц относительно осей OZ и OX. Программа рассчитывает затем начальные проекции вектора: WX0, WY0, WZ0.  

$$WX0 = \sin\vartheta \cdot \cos\varphi; \quad WY0 = \sin\vartheta \cdot \sin\varphi; \quad WZ0 = \cos\vartheta.$$
 Для второго типа углового распределения эта информация игнорируется.
    - 2 – изотропный вперед в конусе с раствором UGR (половина угла при вершине конуса). Если мононаправленный, то UGR игнорируется.
  - 6) [0.d0,0.d0 !teta,fi] – углы (град.) вектора направления частиц источника относительно осей OZ и OX.
  - 7) [15. !UGR] – половина угла при вершине конуса коллиматора (град).
  - 8) [0.d0,0.d0,0.d0 !X0,Y0,Z0] – начальные координаты частиц (см).
  - 9) [1.d0 !Q0] – начальный вес частиц.

Результаты расчета с источником IST\_XRBR нормируются на 1 фотон (на одну испущенную частицу, как у всех источников). Рассмотрим, как перейти к нормировке на 1 электрон или на ток ускорителя (рентгеновской трубки).

Размерность спектров тормозного (ТИ) и рентгеновского (РИ) излучения, из которых разыгрываются энергии фотонов (фотон/МэВ\*ср\*электрон), т.е. это спектры в определенных направлениях. Для ТИ это направление 0 гр. (полярный угол) относительно электронного пучка. Для РИ это 45гр. Назад относительно нормали к мишени, электронный пучок трубки падает на мишень также под углом 45 гр. (Более подробно см. [2]). Интеграл от спектров по энергии дает величину  $\alpha$  с размерностью (фотон/ср\*электрон) – число фотонов в единицу телесного угла на 1 электрон. Эта величина вычисляется при нормировке спектров и расчете функции распределения (см. "площадь под гистограммой" SNGE в файле результатов).

Если умножить результат расчета  $X(??*\text{фотон})$  на  $\alpha$  и на величину телесного угла коллиматора источника  $U(\text{ср})$ , то получим:  $Y(??*\text{электрон})$ . Если

умножить  $Y$  на  $6,25 \cdot 10^{19}$  (электрон/А\*с), то получим  $Z(?!/*A*с)$ . Например, если  $X$  – доза, то  $Z$  – мощность дозы при токе 1 А.

Менять нормировку результатов можно как после проведения расчетов, так и сразу, задавая соответствующее значение начального веса частиц  $Q0$ .

***IST\_ISOCYL – источник равномерный и изотропный  
на поверхности цилиндра***

(на примере файла `exampl_10.de5` из режима FLUX)

----- ОСНОВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST\_ISOCYL  
(вводится всегда)

```
ist_isocyl                ! nameist
5                          ! NGIST
2                          ! NEIST
1                          ! NPO
1.d0                      ! E0
1.d0                      ! Q0
75.369d0                  ! RIS
0.d0,200.84d0             ! Z1_IST,Z2_IST
```

- =====
- 1) [ist\_isocyl !nameist] – имя источника;
  - 2) [5 !NGIST] – тип геометрии (пространственного распределения) источника:
    - 1 – равномерный, изотропный слева (от 0 до RIS);
    - 2 – равномерный, изотропный справа (от 0 до RIS);
    - 3 – равномерный, изотропный слева и справа (от 0 до RIS);
    - 4 – равномерный, изотропный на цилиндрич. поверхности (от Z1\_IST до Z2\_IST);
    - 5 – полностью равномерный и изотропный (слева, справа, на цилиндрической поверхности).
  - 3) [2 !NEIST] – тип энергии источника:
    - 1 - моноэнергетический,
    - 2 - сплошной спектр функция\_1 (элект-ны  $E_{min}=0.05$  MeV,  $E_{max}=7$  MeV);
    - 3 - сплошной спектр функция\_2 (протоны  $E_{min}=5$  MeV,  $E_{max}=1000$  MeV).
    - 4 – сплошной спектр гистограмма произвольная для любых частиц.
  - 4) [1 !NPO] – тип частиц, испускаемых источником:
    - 0 – фотоны;
    - 1 – электроны;
    - 2 – позитроны;
    - 3 – протоны.
  - 5) [1.d0 !E0] – начальная энергия частиц источника (МэВ).
  - 6) [1.d0 !Q0] – начальный вес частиц источника.
  - 7) [75.369d0 !RIS] – радиус источника (см).
  - 8) [0.d0,200.84d0 !Z1\_IST,Z2\_IST] – границы торцов цилиндра по Z.

*Не вся основная информация используется в зависимости от NGIST и NEIST*

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА IST\_ISOCYL  
ЭНЕРГИЯ

а) если NEIST=2

дифференциальный энергетический спектр потока электронов РПЗ

$f(E) = (C1/C2) * \text{EXP}(-E/C2)$ ; Emin-Emax [0.05-7.0] МэВ;

C1 [электрон/(см<sup>2</sup>\*с)]; C2 [МэВ] [0.29-0.42].

Функция распределения вычисляется источником

9) [2.e07,0.35 !C1,C2] – значения C1 и C2;

10) [0.1,5.0 !Emin,Emax] – минимальная и максимальная энергия спектра [МэВ];

11) [1 !NSW] – признак: NSW=0 – аналоговое моделирование энергии (в соответствии с функцией распределения), NSW=1 – неаналоговое моделирование спектра из равномерного распределения с весом, что позволяет увеличить выход высокоэнергетической части быстро спадающего спектра.

б) если NEIST=3 (см. FLUX, exampl\_11.de5)

дифференциальный спектр (пикового) потока протонов

$f(E) = 2\pi * D * ((R/239)^{-y})/b$ ;  $b = v/c$ ;  $y = g * (E/30)^u$ ; интервал

Emin-Emax [5-1000] МэВ;  $R = (E * (E + 938))^{1/2}$ ;  $D [1/\text{см}^2 * \text{ср} * \text{с} * \text{МэВ}]$ ;

значения D, g, u даны в ГОСТ Р 25645.165-2001

Функция распределения вычисляется источником

9) [702.,3.44,0.09 !D,g,u] – значения D, g, u

10) [5.,1000. !Emin,Emax] – минимальная и максимальная энергия спектра [МэВ];

11) [0 !NSW] – признак: NSW=0 – аналоговое моделирование энергии (в соответствии с функцией распределения), NSW=1 – неаналоговое моделирование спектра из равномерного распределения с весом, что позволяет увеличить выход высокоэнергетической части быстро спадающего спектра.

в) если NEIST=4 (см. FLUX, exampl\_12.de5)

сплошной спектр гистограмма произвольная для любых частиц

9) [48 !NE\_GIST] – число интервалов гистограммы (MAX 100)

10) значения энергий гистограммы (число = NE\_GIST+1)

задано .005,.01,.015,...

11) значения спектра (число = NE\_GIST)

задано .76E-05,.807E-03,.00978,.00218,...

11) [0 !NSW] – признак: NSW=0 – аналоговое моделирование энергии (в соответствии с функцией распределения), NSW=1 – неаналоговое моделирование спектра из равномерного распределения с весом, что позволяет увеличить выход высокоэнергетической части быстро спадающего спектра.

### **Список литературы**

1. Беспалов В.И. **Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц** // Изв. вузов Физика, Приложение. – 2000. – № 4. – С. 159–165.
2. Беспалов В.И. **Лекции по радиационной защите**: учебное пособие. 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 695 с.

### **3.7. Режим ФАНТОМ (PHANTOM)**

#### **3.7.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются**

Рассчитывается трехмерное пространственное распределение поглощенной энергии в детекторе (основной детектор), представляющем собой прямо-

угольный параллелепипед, разбитый по X, Y, Z на элементарные воксели. Детектор может имитировать фантом, а геометрия, в которую он может быть помещен, может имитировать реальную геометрию дистанционной лучевой терапии на пучках фотонов, электронов и протонов. Возможен расчет пространственного распределения дозы и для других режимов облучения, не связанных с задачами лучевой терапии. Рассчитывается X,Y распределение частиц, падающих на заданный слой (по Z) детектора и их спектр. Возможен учет электрического и магнитного поля в зонах, где нет детекторов.

### 3.7.2. Порядок работы в режиме PHANTOM

ВНИМАНИЕ!

*для корректного отображения результатов расчета в этом режиме необходим дисплей формата 3/4 с разрешением не менее 1280x1024.*

ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ДЕТЕКТОРА ЭТОТ РЕЖИМ ИСПОЛЬЗУЕТ МНОГОМЕРНЫЕ МАССИВЫ, КОТОРЫЕ ЯВЛЯЮТСЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ (ИХ РАЗМЕРЫ ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ), ПОЭТОМУ ЧИСЛО СЛОЕВ (РАЗБИЕНИЙ) ПО ВСЕМ ТРЕМ ОСЯМ ДЕТЕКТОРА МОЖЕТ БЫТЬ БОЛЬШИМ, НО ПРОГРАММА НЕ ПОЗВОЛЯЕТ ЗАДАВАТЬ ПОПЕРЕЧНЫЕ РАЗМЕРЫ СЛОЯ МЕНЕЕ 1 ПИКСЕЛА ЭКРАНА.

ПОМНИТЕ, ЧТО БОЛЬШОЕ РАЗБИЕНИЕ ТРЕБУЕТ НЕ ТОЛЬКО БОЛЬШОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ, НО И БОЛЬШЕГО ВРЕМЕНИ РАСЧЕТА.

1) Работа начинается через меню: PHANTOM ⇒ **Start PHANTOM**

Правильная остановка программы PHANTOM ⇒ **Stop PHANTOM**;

Выход из программы **File** ⇒ **Exit**;

Остановка работы на некоторое время **Pause** ⇒ **Pause**;

Продолжение работы **Pause** ⇒ **Resume**.

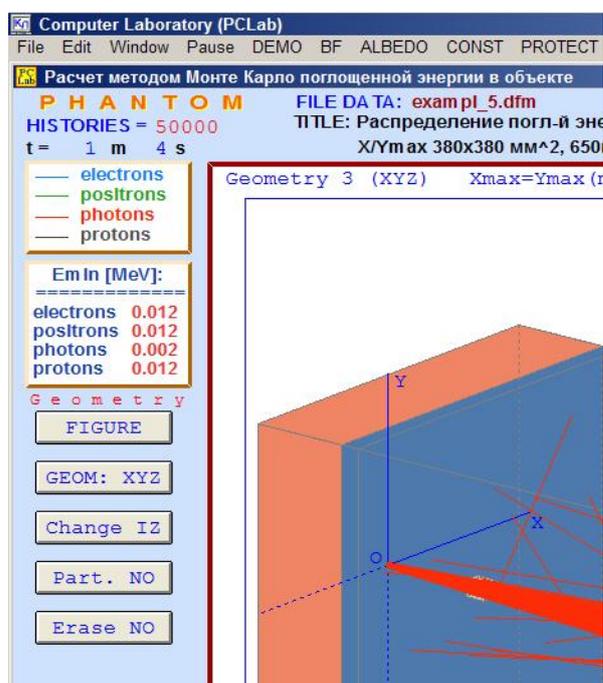


Рис. 3.7.1. Снимок левой части экрана в режиме PHANTOM

2) В режиме PHANTOM необходимые для расчета данные вводятся из файла данных. Оформление таких файлов см. ниже и файл помощи Data File в меню PHANTOM. Файл с данными для расчета должен находиться в папке ...\PCLAB\PHANTOM. В данной версии имеются 12 файлов данных в качестве примеров различных режимов моделирования.

3) В двух маленьких окнах слева отображаются цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории.

4) Программа предложит выбрать одну из 4-х геометрий, в которой будет изображена схема

облучения (в большом окне). В это окно выводятся траектории частиц и результаты расчета в графическом виде.

5) В двух маленьких окнах слева показаны цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории.

6) Кнопки слева под надписью «Geometry» (см. рис. 3.7.1) позволяют управлять информацией в большом окне при отображении всей геометрии моделирования в различных проекциях и выводе траекторий частиц:

**1-я** выводит рисунок барьера и траектории частиц (FIGURE) или переводит окно в режим вывода результатов (DATA). После этого надо пользоваться правыми кнопками под надписью "Data";

**2-я** "GEOM: XY/ZY/XYZ/ZX" меняет тип проекции, в которой отображается вся схема облучения и выводятся траектории частиц;

**3-я** "Change IZ" меняет номер слоя по Z, который отображается в GEOM: XY;

**4-я** "Part. YES/NO" включает или отключает вывод траекторий частиц на экран в процессе моделирования;

**5-я** "Erase. YES/NO" включает или отключает режим чистки окна геометрии. В режиме YES на экране отображаются последовательно траектории частиц только одной истории. В режиме NO выводятся без чистки все траектории. Кнопка работает, только при включенном (YES) выводе траекторий частиц на экран.

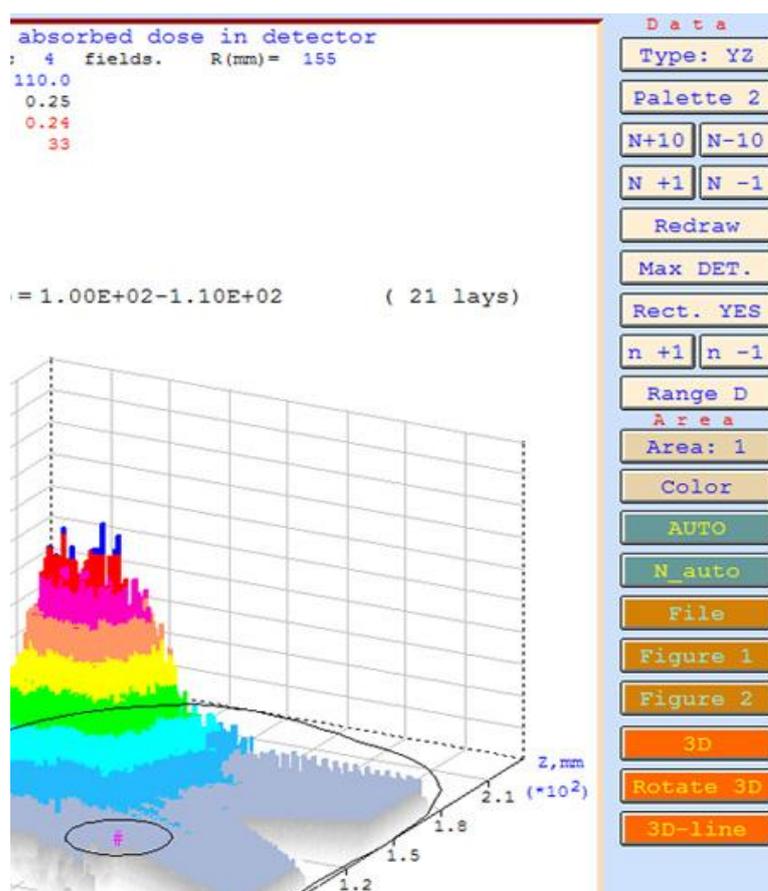


Рис. 3.7.2. Снимок правой части экрана в режиме PHANTOM

7) Кнопки справа под надписью "Data" (рис. 3.7.2) позволяют управлять информацией в большом (графическом) окне при выводе в него результатов моделирования. Работают, если 1-й кнопкой слева включено "DATA".

- 1-я** "Type: XY/YZ" меняет тип проекции (геометрии), в которой выводятся результаты расчета. Результаты можно смотреть как во время моделирования, так и после, если не чистить экран;
- 2-я** "Palette N" меняет тип палитры для закраски вокселей с поглощенной энергией, N- номер палитры. Образ палитры отображается слева внизу экрана. Цифры у вертикальной оси палитры показывают соответствие цвета и величины (в долях от max) дозы в каждом вокселе;
- 3а** "N+10" и **3б** "N-10" – увеличивают (уменьшают) на 10 номер слоя детектора, распределение дозы в котором выводится на экран;
- 4а** "N+1" и **4б** "N-1" – увеличивают (уменьшают) на 1 номер слоя детектора, распределение дозы в котором выводится на экран;
- 5-я** "Redraw" перерисовывает результаты на экране с нормировкой на число историй, рассчитанных к данному моменту;
- 6-я** Нормирует распределение дозы в слое детектора, которое выводится на экран, на максимальное значение в детекторе "Max DET." или в этом слое "Max LAYER". Тип текущей нормировки указан слева внизу окна результатов;
- 7-я** "Rect. YES/NO" включает/выключает режим выдачи дозы в прямоугольной области определенных размеров в любом месте слоя ОД, который выведен на экран;
- 8а** "n+1" и **8б** "n-1" – увеличивают/уменьшают размеры прямоугольной области;
- 9-я** "Range D" позволяет менять MIN и MAX значения диапазона дозы, в пределах которого ее значения отображаются на экране в графическом виде;
- Две кнопки под словом "Area" работают с областями в ОД, если они заданы:
- "Area n" – меняет номер области n, доза в которой выводится слева в разделе "Dose in area";
  - "Color" – позволяет изменить цвет границы любой области. Работает, когда на экран выведен слой, который принадлежит области.
- Следующие две кнопки меняют порядок выдачи результатов на экран:
- "AUTO/MANUAL" – позволяет включить режим AUTO, при котором результаты на экране перерисовываются после расчета определенного количества историй, или режим MANUAL, в котором это надо делать вручную (с помощью кнопки "Redraw"). Ручной режим удобен для просмотра и анализа результатов, чтобы они произвольно не менялись;
  - "N-auto" – позволяет менять число историй, после расчета которых происходит выдача результатов на экран в режиме AUTO;
  - "File" – с помощью этой кнопки можно сбросить текстовую информацию с экрана (если включен режим результатов "DATA") в файл результатов;
  - "Figure 1" – с помощью этой кнопки можно сохранить в графическом виде всю область экрана в графический растровый файл формата bmp (и в режиме "FIGURE", и в режиме "DATA");

- "Figure 2" – с помощью этой кнопки можно сохранить в графическом виде всю область графического окна с экрана (и в режиме "FIGURE", и в режиме "DATA") в графический растровый файл формата bmp;
- "2D/3D" – позволяет менять графический режим выдачи результатов на экран: 2D; 3D;
- "Rotate 3D" – позволяет поворачивать рисунок в 3D режиме;
- "3D-line/point" – позволяет менять способ выдачи данных в 3D режиме.

### 3.7.3. Структура файлов данных в режиме PHANTOM

Режим PHANTOM вводит необходимые для расчета данные из файла данных, который должен иметь расширение .dfm и длину не более 20 символов. Рассмотрим порядок составления этих файлов на примере нескольких файлов данных с именами exampl\*.dfm, которые находятся в папке ...\\PCLAB\\PHANTOM (копии в ...\\PCLAB\\PHANTOM\\EXAMPLES). Каждый файл примеров решает определенную задачу и данные не являющиеся необходимыми для нее могут в файле отсутствовать. Поэтому каждый файл разбит на части, соответствующие определенным группам данных.

#### ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ФАЙЛОВ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

##### Файл exampl\_1.dfm

ЗАДАЧА: расчет характеристик плоского источника (ПИ) для гамма-аппарата Theratron-780. (ПИ см. файл PCLAB\_medphys.doc в папке ...\\PCLAB\\DOC). Геометрия данного примера показана на рис. 3.7.3.

входные данные exampl\_1.dfm

часть 1 (ГЕОМЕТРИЯ)

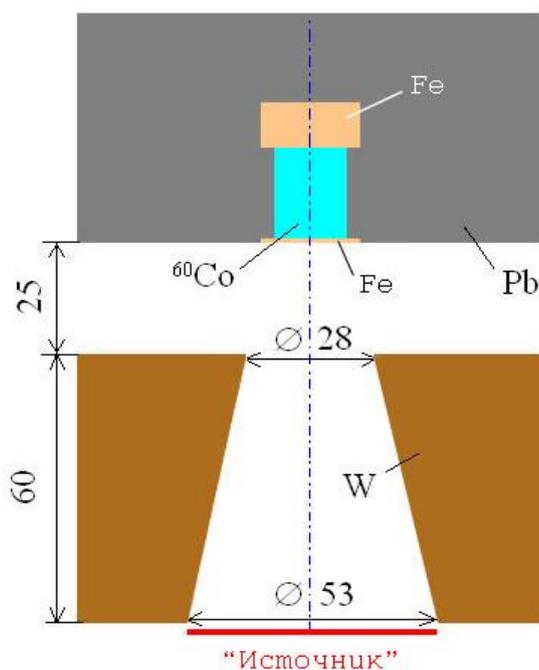


Рис. 3.7.3. Схема геометрии расчета ПИ для аппарата Theratron 780. Размеры в мм.

theratron.fce

TITLE: Расчет расчет характеристик плоского источника (ПИ) для гамма-аппарата Тераatron-780.

TITLE: ПИ- см. файл PCLAB\_medphys.doc в папке ...\PCLAB\DOC

```
11,8,5,6,15,2,7      ! NCFIG
5                    ! NBZ_NO
100.d0               ! XY_MAX(mm)
5,31,31             ! NLAY_Z,NX_DET,NY_DET
7                    ! LZ
0                    ! NTYPE_ZON
2,20.d0             ! NBZ,dZ(mm)
2                    ! NTYPE_ZON
2,10.d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO_ZON
2                    ! NTYPE_ZON
2,20.d0,0.d0,0.d0,7.5d0,1 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO_ZON
2                    ! NTYPE_ZON
2,0.8d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO_ZON
0                    ! NTYPE_ZON
5,25.d0             ! NBZ,dZ(mm)
6                    ! NTYPE_ZON
4,60.d0,0.d0,0.d0,14.d0,26.5d0,5 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,RCON1,RCON2,NBO_ZON
3                    ! NTYPE_ZON
6,25.d0             ! NBZ,dZ(mm)
                    часть 2 (ДЕТЕКТОР ПУЧКА)
0                    ! K_RODET
                    часть 3 (ОБЛАСТИ)
0                    ! NAREA_DET
                    часть 4 (ОЧАГОВАЯ ДОЗА)
0                    ! NPR_FD
                    часть 5 (ВРАЩЕНИЕ)
0                    ! N_ROT
                    часть 6 (ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА)
1.0                 ! DSMPER
1                    ! NEPG
0                    ! NANOSR
0                    ! NZ_POGL
-1,1,0.08,100,1,90.,90 ! NXYE_PART,NZ_XYEPART,EMAX_XYE,NINT_XYE,
                    NTSP_XYE,UMAX_XYU,NINT_XYU
                    часть 7 (ПОЛЕ)
0                    ! NPR_FIELD_PH
                    часть 8 (ИСТОРИИ)
100000000          ! NISTM
500000             ! NIST_PR
0                    ! ITZAD
                    часть 9 (ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК)
1                    ! NP_ISTDAT
ther15_20          ! nam_istdat
Theratron-780 Co-60: h15, d20 + first collimator.
```

7,136.,0	! NZON_ISTDAT,Z_ISTDAT,NS_ISTDAT
26.5	! R_ISTDAT
1000000,4	! NPR_MAX,NP_PART
1.34,0.01,0.24,30.	! EMAX_SP,EMING_SP,EMINE_SP,TET_POR
100,11,45	! NING_SP,NINE_SP,NIN_UG
30	! NIN_RAD
	часть 10 (ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ)
0,5	! NP_YXDOSE,NZSL
0	! NPR2_NDP
0,1	! NPR3_NDP,NZSL
	часть 11 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)
phan_istrad	! nameist
2	! NGIST
1	! NUIST
0.d0,0.d0	! teta,fi
0.d0,0.d0,0.d0	! X0,Y0,Z0(мм)
1.d0	! Q0
1.0	! RIS(мм)
0.0,7.5	! R1,R2(мм)
30.,50.	! ZN,ZK(мм)
180.0	! UGR
0	! NPR_UG
1,0,0,0,0,0	! np_gam,np_xri,np_alf,np_bemi,np_bep1,np_ice
0.5	! cng_min
0.5	! cnx_min
1	! n_rad число р/нукл
Co-60	! имя р/нукл
1	! вклад в активность

описание exampl\_1.dfm

часть 1 ГЕОМЕТРИЯ (есть во всех задачах)

1) [theratron.fce] – имя файла, рассчитанного программой CONST, с расширением "fce" (см. меню CONST->Help CONST).

2) [TITLE:...]

3) [TITLE:...] – две строки с кратким описанием файла (max 100 символов в каждой).

4) [11,8,5,6,15,2 !NCFIG] – номера цвета веществ, которыми они отображаются на экране. Их количество должно быть не менее числа веществ, для которых рассчитан файл констант с расширением "fce" программой CONST (см. пункт 1). Цвета и их номера можно увидеть через раздел меню "Palette".

5) [5 !NBZ\_NO] – номер вещества, которое не надо отображать на схеме облучения в геометрии 3.

*В этом случае 3х-мерный рисунок может выглядеть более подробно. Указывайте номер вещества, в котором находятся элементы конструкции (например, воздух). Задайте 0, если хотите рисовать все вещества.*

6) [100.d0 !XY\_MAX(mm)] – max размер всех зон (всей схемы облучения) по X и Y от оси Z. Задается в мм.

Схема (геометрия) облучения задается в прямоугольной геометрии в основной системе координат (ОСК), в которой ось Z находится в центре прямоугольных зон. Максимальные размеры всех зон по X и Y одинаковы.

**! РАЗМЕРЫ ВСЕХ ПРЯМОУГОЛЬНИКОВ ЗАДАЮТСЯ ОТ ИХ ЦЕНТРА !**

7) [5,31,31 ! NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET] NLAY\_Z – число слоев ОСНОВНОГО детектора по Z (max=1000), NX\_DET, NY\_DET – число интервалов детектора по X, Y (max=1000 по каждой оси).

Основной детектор (ОД) должен присутствовать в каждой задаче. Он делится по X,Y,Z на элементарные воксели, в которых вычисляется поглощенная энергия. Число интервалов по X,Y задается по всей ширине и высоте детектора. Программа сама уменьшит задаваемые значения, если поперечный размер ячейки будет меньше 1 пиксела. **ВНИМАНИЕ!** Большое разбиение дает более точное пространственное распределение дозы, но требует большей памяти и времени расчета.

8) [7 !LZ] – число всех зон схемы облучения по Z.

Вся геометрия делится на КВАДРАТНЫЕ ОСНОВНЫЕ ЗОНЫ только вдоль оси Z. Их максимальное число равно 100. Основные зоны состоят из ОСНОВНОГО ВЕЩЕСТВА. В основных зонах могут находиться:

а) по одной ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ области определенной формы со своим ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ веществом. Толщина дополнительной области по Z равна толщине основной зоны. Центры всех дополнительных областей по X, Y расположены произвольно. Дополнительные области не пересекаются с границами основных зон по X, Y, но могут их касаться;

б) детектор пучка/опорный детектор, имеющий рабочую область и стенку. Центр этого детектора по X, Y расположен произвольно. В этом случае в зоне могут находиться 3 разных вещества. Каждая зона имеет свой тип:

- 0 – простая (пустая) зона (без объектов). Состоит из одного вещества;
- 1 – зона с прямоугольником. В основной зоне находится прямоугольная область из основного или другого (ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО) вещества;
- 2 – зона с кругом. В основной зоне находится круглая область из основного или другого (ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО) вещества;
- 3 – вся зона ОСНОВНОЙ ДЕТЕКТОР (ОД);
- 4 – зона с прямоугольным ОСНОВНЫМ ДЕТЕКТОРОМ. В основной зоне находится прямоугольная область из основного или другого (ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО) вещества. Эта область является основным детектором. В отличие от (3) размер детектора по X, Y меньше размера зоны;
- 5 – зона с квадратным ДЕТЕКТОРОМ ПУЧКА (ОПОРНЫМ ДЕТЕКТОРОМ). Детектор пучка (ДП/ВД) необходим, чтобы перейти от результатов расчета, нормированных на 1 частицу (распад), к результатам реальной установки, которая моделируется в расчете. Этот детектор не делится на элементарные воксели. Расчетный ДП должен соответствовать реальному ДП, характеристики которого (расстояние от источника и мощность дозы) НЕОБХОДИМО ОБЯЗАТЕЛЬНО ЗАДАТЬ (см. задачу 2);
- 6 – зона с конусом. В основной зоне находится коническая область из ос-

нового или другого вещества. Например, позволяет имитировать коллиматор. Радиус конуса возрастает с увеличением  $Z$ ;

**61** – зона с конусом. В основной зоне находится коническая область (мнимая часть прямого кругового конуса) из основного или другого вещества. Радиус конуса уменьшается с увеличением  $Z$ . Информация вводится также как для **(6)**;

**7** – зона с круглым ДЕТЕКТОРОМ ПУЧКА (см. 5);

**8** – зона с кольцом. В основной зоне находится кольцо из другого вещества. Внутренняя область кольца может состоять из любого вещества (см. файл exampl\_8.dfm);

**9** – зона с прямоугольной рамкой. В основной зоне находится прямоугольная рамка из другого вещества. Внутренняя область рамки может состоять из любого вещества;

**10** – зона с цилиндром. В основной зоне находится сплошная цилиндрическая область из любого вещества, расположенная и ориентированная произвольно в зоне. Диаметр цилиндра совпадает с толщиной зоны по оси  $Z$ . (см. файл данных примера 15).

**11** – зона с шаром. В основной зоне находится сплошная сферическая область из любого вещества, расположенная произвольно в зоне. Диаметр сферы (шара) совпадает с толщиной зоны по оси  $Z$ . (см. файл примера 17).

**12** – зона с параллелепипедом 1. В основной зоне находится сплошная область из любого вещества в виде параллелепипеда. Его торцевые грани (вдоль оси  $Z$ ) находятся на левой и правой границах основной зоны по  $Z$ . Расположен параллельно пл.  $YZ$ . Может полностью находиться внутри зоны по  $X$  и  $Y$ . Угол поворота относительно оси  $Z$  в пл.  $XZ$  не более  $\pm 89^\circ$  (см. файл примера 18).

**13** – зона с параллелепипедом 2. В основной зоне находится сплошная область из любого вещества в виде параллелепипеда. Он рассекает всю зону по  $X$  и  $Y$ . Торцевые грани находятся на границах зоны по  $X$  и  $Y$ . Повернут относительно оси  $Z$  на угол  $1^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Вещество ОЗ слева и справа параллелепипеда может быть разным. (см. файл примера 19).

9) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 1-й зоны. Пустая (простая) зона.

10) [2,20.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по  $Z$ .

11) [2 !NTYPE\_ZON] – тип 2-й зоны. Зона с кругом.

12) [2,10.d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO\_ZON] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по  $Z$  (мм); OXO,OYO – координаты центра круга в пл.  $XY$  зоны (мм); RKR – радиус круга (мм); NBO\_ZON – номер вещества области круга.

13) [2 !NTYPE\_ZON] – тип 3-й зоны. Зона с кругом.

14) [2,20.d0,0.d0,0.d0,7.5d0,1 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO\_ZON] – см. (12).

15) [2 !NTYPE\_ZON] – тип 4-й зоны. Зона с кругом.

16) [2,0.8d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO\_ZON] – см. (12).

17) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 5-й зоны. Простая зона.

18) [5,25.d0 !NBZ,dZ(mm)] – см. (10).

19) [6 !NTYPE\_ZON] – тип 6-й зоны. Зона с конусом.

20) [4,60.d0,0.d0,0.d0,14.d0,26.5d0,5!NBZ,dZ,OXO,OYO,RCON1,RCON2,NBO\_ZON]

NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z(мм); OXO, OYO – координаты оси конуса в пл. XY зоны(мм); RCON1,RCON2 – радиусы окружностей конуса (мм). RCON1 по Z в начале зоны, RCON2 – в конце, RCON2 > RCON1; NBO\_ZON – номер вещества области конуса.

21) [3 !NTYPE\_ZON] – тип 7-й зоны. Вся зона ОСНОВНОЙ ДЕТЕКТОР.

22) [6,25.d0 !NBZ,dZ(mm)]NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z. В данной задаче основная цель – расчет плоского источника, поэтому ОД здесь присутствует чисто формально.

### ДРУГИЕ ТИПЫ ЗОН

Если задан тип зоны 1(с прямоугольником), то ввод данных для нее как для конуса: !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON, но OXO, OYO- координаты центра прямоугольника (мм) в пл. XY зоны; DXP,DYP – это размеры прямоугольника (мм) по X и Y от его центра; NBO\_ZON – номер вещества области прямоугольника.

Если задан тип зоны 4 (с прямоугольным ОД), то ввод данных для нее как для зоны с прямоугольником.

Если задан тип зоны 5 (с детектором пучка), то ввод данных для нее (из примера 4): [1,1.d0,10.d0,2 !NBZ,dZ,DXY\_ODET,NBO\_ZON]NBZ –номер основного вещества зоны, в которой задан ДП; dZ – толщина этой зоны и ДП по Z; DXY\_ODET – размер прямоугольной области ДП в мм от центра прямоугольника; NBO\_ZON – номер вещества области ДП.

Если задан тип зоны 7 (с круглым ДЕТЕКТОРОМ ПУЧКА), то ввод анных для нее см. help-файл, пример 5.

Если задан тип зоны 8 (с кольцом), то ввод данных для нее см. help-файл, примера 8.

Если задан тип зоны 9 (с прямоугольной рамкой), то ввод данных для нее см. help-файл, пример 8.

Если задан тип зоны 10 (с цилиндром), то ввод данных для нее: !NBZ,dZ,OXO,OYO,L2\_CYL,FI\_CYL,NBO\_ZON, где L2\_CYL – 1/2 длины цилиндра от его центра (мм), FI\_CYL – угол поворота цилиндра вокруг оси Z относительно оси X (0-180 град). См. файл данных 15 примера.

Если задан тип зоны 11 (с шаром/сферой), то ввод данных для нее: !NBZ,dZ,OXO,OYO,NBO\_ZON. См. файл данных 17 примера.

Если задан тип зоны 12 (с параллелепипедом 1), то ввод данных для нее: !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,PSI\_PRL,NBO\_ZON – почти как у зоны с прямоугольником, но дополнительно PSI\_PRL – угол поворота параллелепипеда относительно оси Z. См. файл данных 18 примера.

Если задан тип зоны 13 (с параллелепипедом 2),то ввод данных для нее: !NBZ,NBO\_ZON,NBZ\_2,dZ,OZO,DZP,PSI\_PRL: NBZ – номер вещества ОЗ слева от паралл., NBO\_ZON – номер вещества паралл., NBZ\_2 – номер вещества ОЗ справа от паралл., dZ- толщина зоны по Z (мм), OZO – центр паралл. по Z относительно данной зоны (мм), DZP – толщина паралл. (мм),

PSI\_PRL – угол поворота паралл. относительно оси Z (град). См. файл данных 19 примера.

- =====
- часть 2 ДЕТЕКТОР ПУЧКА (здесь НЕТ, см. пример 2)
- 23) [0 !K\_RODET]– признак характеристик РЕАЛЬНОГО ДП: 0– нет; 1 – есть.  
часть 2 ОБЛАСТИ (здесь их НЕТ, см. пример 3)
- 24) [0 !NAREA\_DET] – число заданных внутренних областей детектора. 0 – НЕТ заданных областей в детекторе.  
часть 3 ОЧАГОВАЯ ДОЗА (здесь НЕТ, см. пример 3)
- 25) [0 !NPR\_FD] – признак: 0 – не учитывать, 1 – учитывать информацию об очаговой (фокальной) дозе. Здесь не учитывается.  
часть 5 ВРАЩЕНИЕ (здесь НЕТ, см. задачу 4)
- 26) [0 !N\_ROT] – признак вращения излучения источника: 0 – 0 нет, 1 – есть. Здесь вращения источника НЕТ.  
часть 6 ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА (есть во всех задачах)
- 27) [1.0 !DSMPER] DSMPER – коэффициент, который позволяет уменьшать величину отрезка траектории заряженных частиц при пересечении границы зоны. Это позволяет более точно рассчитывать характеристики поля излучения вблизи границы раздела сред.  $0.25 \leq DSMPER \leq 1$ . Уменьшение DSMPER увеличивает время счета.
- 28) [1 !NEPG] NEPG – признак поглощения фотонов при  $E < E_{min}$  (0 –нет, 1 – да). Да (1) – оставшаяся энергия фотона добавляется к поглощенной энергии.
- 29) [0 !NANOSR] NANOSR – признак (0 –нет; 1 – да) для аналитического осреднения поглощенной энергии фотонов в основном детекторе (НЕАНАЛОГОВОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ФОТОНОВ). Зачем нужно, достоинства и недостатки см. файл PCLAB\_medphys.doc в папке ...\PCLAB\DOC.
- 30) [0 !NZ\_POGL]– число зон по Z, где возможно дополнительное поглощение частиц. Это возможно во всех зонах. Программа формирует массив признаков, определяющих способ поглощения частиц NPOGL(i, j), i – номер зоны, j – признак.
- Если NZ\_POGL > 0, то необходимо ввести следующую информацию (например): 3,1,0,4: i=3 (поглощение в 3 зоне), j(1)=0 поглощать, 0 – нет (здесь j(1) = 1); j(2) = 0 – в основной области зоны (или слева от паралл. 2), 1 – во всей дополнительной области, 2– в веществе доп. области (кольцо, рамка, квадр. ДП, кругл. ДП) или справа от паралл. 2, 3 – во внутренней части областей: кольцо, рамка, квадр. ДП, кругл. ДП, 4 – во всей зоне (здесь j2=0); j(3)– тип частиц, которые поглощаются: 0 – фотоны, 1 – электроны, 2 – позитроны, 3 – протоны, 4 – все зар. частицы, 5 – все частицы (здесь j3=4). Если дополнительное поглощение задается в нескольких зонах по Z, то 4 цифры для последующих зон вводятся в дополнительных строчках.

*Поглощение позволяет уменьшить время расчета, убрав ненужное излучение (не моделируя траектории в некоторых зонах). Например, электроны, которые падают из воздуха на детектор или на защитный слой и т.д. См. пример 8.*

31) [-1,1,0.08,100,1,90.,90 !NXYE\_PART,NZ\_XYEPART,EMAX\_XYE,NINT\_XYE,NTSP\_XYE,UMAX\_XYU,NINT\_XYU] NXYE\_PART-признак расчета (X,Y) распределения частиц, падающих на n-й слой ОД и спектра этих частиц (углы < 90град). – 1 не считать, 0 – фотоны, 1 – электроны, 2 – позитроны, 3 – протоны, 4 – электроны+позитроны; NZ\_XYEPART – номер слоя ОД по Z, для которого проводятся вычисления; EMAX\_XYE – E<sub>max</sub> частиц (МэВ); NINT\_XYE – число интервалов спектра (max=400); NTSP\_XYE – масштаб спектра: 1–линейный, 2–логарифмический (см. пример 14); UMAX\_XYU – max угол (град) в угловом распределении (частицы с U > UMAX\_XYU не учитываются); NINT\_XYU – число интервалов углового распределения.

Число интервалов (X,Y) распределения по X и Y как у ОД. (X,Y) распределение записывается в 2 файла: 1) в виде матрицы: X–столбцы, Y–строки. Имя файла как у файла данных, расширение ghu. С помощью этой матрицы можно построить 3-D поверхность в программе ORIGIN; 2) в виде 3-х столбцов X, Y, f(x,y) с учетом, что по X и Y это гистограммы. Имя файла как у файла данных, расширение dat. Этот файл позволяет построить 3-D поверхность в программах SURFER и GRAPHER (см. рис. 3.7.5).

часть 7 ПОЛЕ (здесь НЕТ, см. файл 16 примера)

32) [0 !NPR\_FIELD\_PH]NPR\_FIELD\_PH – признак наличия электрического/магнитного поля в зонах: 0– НЕТ, 1– ЕСТЬ. В зонах с детекторами поля НЕТ! ---- если NPR\_FIELD\_PH =1, то дополнительно следует ввести (из 16 примера): [4 !NZ]– номер зоны по Z, в которой присутствует поле.

[0,1,0.d0,0.d0,-5.d0 !i, j, Ux, Uy, Uz] i–номер области зоны: 0– основная, 1– дополнительная, 2 – стенка (кольцо, рамка); j – тип поля: 1 – электрическое (E), 2 – магнитное (B), 3– E+B; Ux, Uy, Uz– 3 проекции поля (E– напряженность электрического поля кВ/см; B– индукция магнитного поля Тл).

Далее эти 2 строчки данных повторяются, если есть поле в других зонах или в других областях данной зоны. Заканчивается ввод данных поля строчкой: 0 !NZ=0(End). См. файл данных 16 примера.

часть 8 ИСТОРИИ (есть во всех задачах)

33) [100000000 !NISTM] – максимальное число историй (любое число).

34) [500000 !NIST\_PR] – число историй, после моделирования которых происходят периодические (промежуточные) выдачи результатов расчета в специальный файл (... \PCLAB\PHANTOM\res\_prom.ftm).

35) [0 !ITZAD] – время задержки (мсек) перед построением очередного элемента траектории частиц на экране. 0 – нет задержки.

*ВНИМАНИЕ! Моделирование с построением траекторий частиц на экране (особенно с использованием задержки) выполняется намного медленнее, чем без построения.*

часть 9 ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК(есть в этой задаче)

36) [1 !NP\_ISTDAT] –признак расчета характеристик плоского источника(ПИ): 0– не считать, 1– считать и закончить расчет после заполнения файла источника, 2– считать и продолжить расчет после заполнения файла источника. (Если 0, то информация 35-42 не задается).

Если прямой расчет (с учетом всех особенностей реального источника и

геометрии облучения) требует слишком большого времени, то его целесообразно разбить на этапы, например, два. На первом рассчитываются характеристики большого числа частиц, пересекающих в переднем направлении плоскость с заданным  $Z$  внутри круга с радиусом  $R$ . На втором этапе эти данные используются как новый плоский источник (ПИ) для получения окончательного результата. Расчет ПИ – цель данной задачи (см. файл PCLAB\_medphys.doc в папке ...\PCLAB\DOC). Файл ПИ создается как неформатный последовательный файл и содержит следующие характеристики частиц:

тип частицы;  
энергию (МэВ);  
координаты  $X, Y$  (см).  $Z$  у всех одна;  
направляющие косинусы  $W_x, W_y, W_z$ ;  
вес частицы.

37) [ther15\_20 !nam\_istdat] – имя файла ПИ. Последовательный неформатированный файл ПИ создается в папке ...\PHANTOM

*Если файл с таким именем есть в папке, то расчет не начнется, чтобы не испортить информацию в файле. Надо либо удалить старый файл, либо сменить его имя.*

38) [Theratron-780 Co-60: h15, d20 + first collimator.] – описание файла. max 80 символов.

39) [7,136.,0 !NZON\_ISTDAT,Z\_ISTDAT,NS\_ISTDAT] NZON\_ISTDAT – номер зоны по  $Z$ , где вычисляется ПИ; Z\_ISTDAT – граница по  $Z$ (мм); NS\_ISTDAT – тип площади ПИ (0 – круг, 1 – прямоугольник).

40) [26.5 !R\_ISTDAT] – радиус области круглого ПИ от центра зоны (мм).

Если поверхность ПИ прямоугольная, то надо вместо радиуса вводить: DX\_PI, DY\_PI: – размеры прямоугольника по  $X$  и  $Y$  от оси (мм). Центр в т. 0, 0 зоны. (см. пример 11).

41) [1000000,4 !NPR\_MAX,NP\_PART] NPR\_MAX – MAX число частиц в источнике; NP\_PART – тип сохраняемых частиц 0 – фотоны, 1 – электроны, 2 – позитроны, 3 – протоны, 4 – электроны+позитроны, 5 – все частицы.

*Если число записанных частиц в ПИ равно NPR\_MAX, то  
РАСЧЕТ ПРЕКРАЩАЕТСЯ, если NP\_ISTDAT=1*

42) [1.34,0.01,0.24,30. !EMAX\_SP,EMING\_SP,EMINE\_SP,TET\_POR] EMAX\_SP – max энергия сохраняемых частиц (МэВ). Частицы с большей энергией не сохраняются; EMING\_SP – min энергия (МэВ) сохраняемых фотонов(с меньшей не сохраняются); EMINE\_SP – min энергия (МэВ) сохраняемых заряженных частиц (с меньшей не сохраняются); TET\_POR – пороговый полярный(относительно оси  $Z$ ) угол (град) сохраняемых частиц (с большим углом не сохраняются).

43) [100,11,45 !NING\_SP, NINE\_SP, NIN\_UG] NING\_SP – число интервалов спектра фотонов (MAX=400); NINE\_SP – число интервалов спектров заряженных частиц (MAX=400); NIN\_UG – число интервалов угловых распределений всех частиц (MAX=100).

44) [30 !NIN\_RAD] – число интервалов радиальных распределений всех частиц для круглого ПИ (MAX=100).

Если поверхность ПИ прямоугольная, то надо вместо *NIN\_RAD* вводить: *NINX\_PI*, *NINY\_PI*, *NP\_SQPI*: *NINX\_PI*, *NINY\_PI* – число интервалов по *X* и *Y* площади ПИ (*MAX=1000*), *NP\_SQPI* – признак создания файла поверхностного распределения ПИ: (-1) нет, (0) фотонов, (1) электронов, (2) позитронов, (3) протонов, (4) электронов+позитронов (см. пример 11). Двумерное поверхностное распределение ПИ выводится, если число соответствующих частиц более 100.

Данные 41–43 позволяют построить спектры и угловые распределения частиц ПИ, а также радиальные распределения круглого ПИ или поверхностное распределение прямоугольного ПИ. Распределения выводятся для частиц заданного типа, если их число более 100. Двумерное поверхностное распределение ПИ записывается в текстовый файл в виде матрицы: *X* – столбцы, *Y* – строки.

часть 10 ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ (есть во всех задачах)

45) [0,5 !NP\_YXDOSE,NZSL]NP\_YXDOSE – признак создавать(1) не создавать (0) файл с *YX* распределением поглощенной дозы в *Z*-слое ОД, *NZSL* – номер слоя ОД по *Z*, для которого создается *YX* распределение дозы (только для ОДНОГО слоя). Если *NP\_YXDOSE* = 1, то необходимо добавить строку с именем файла (не более 20 символов) см. *exampl\_12*.

46) [0 !NPR1\_NDP] 0 – не выдавать, 1 – выдавать распределение дозы в детекторе вдоль оси *Z* пучка.

47) [0 !NPR2\_NDP] 0 – не выдавать, 1 – выдавать результаты расчета для медицинского анализа: дозы в областях, очаговая доза и т.д.

часть 11 ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ (есть во всех задачах)

48) [*phan\_istrad !nameist*] – начало ввода характеристик источника задачи. Структуру этих данных см. в меню "Sources". Здесь задан РАДИОНУКЛИДНЫЙ ИСТОЧНИК.

### Файл *exampl\_2.dfm*

ЗАДАЧА: расчет процентной дозы в воде для излучения гамма-аппарата Theratron-780. РИП=80см, поле облучения 10x10см<sup>2</sup>. Схема коллимирующей системы Theratron-780 приведена на рис. 3.7.4, а схема геометрии расчета на рис. 3.7.5. Расчет проводится для излучения плоского источника (ПИ), который рассчитан в 1-й задаче. В качестве примера присутствует ДЕТЕКТОР ПУЧКА.

входные данные *exampl\_2.dfm*

часть 1 (ГЕОМЕТРИЯ)

theratron.fce

TITLE: Расчет процентной дозы в воде. Модель Тератрона 780. РИП=80 см. Поле облучения 10x10 см<sup>2</sup>.

TITLE: Источник предварительно рассчитан (ПИ) из 1-го постоянного коллиматора

11,19,5,20,15,2,7

! NCFIG

5

! NBZ\_NO

250.d0

! XY\_MAX(mm)

200,101,101

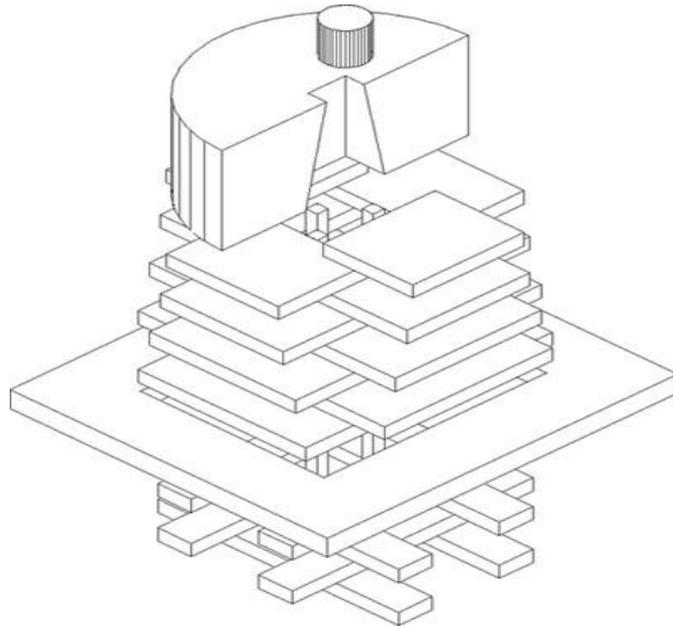
! NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET

21

! LZ

0

! NTYPE\_ZON



**Рис. 3.7.4.** Схема коллимационной системы терапевтического аппарата Theratron-780

2,20.d0	! NBZ,dZ(mm)
2	! NTYPE_ZON
2,10.d0,0.d0,0.d0,9.d0,3	! NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO_ZON
2	! NTYPE_ZON
2,20.d0,0.d0,0.d0,7.5d0,1	! NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO_ZON
2	! NTYPE_ZON
2,0.8d0,0.d0,0.d0,9.d0,3	! NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO_ZON
0	! NTYPE_ZON
5,25.d0	! NBZ,dZ(mm)
6	! NTYPE_ZON
4,60.d0,0.d0,0.d0,14.d0,26.5d0,5	!NBZ,dZ,OXO,OYO,RCON1,RCON2,NBO_ZON
0	! NTYPE_ZON
5,25.d0	! NBZ,dZ(mm)
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,14.7d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,16.0d0,250.d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,17.3d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,18.7d0,250.d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,20.0d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,21.3d0,250.d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,22.6d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
1	! NTYPE_ZON
2,25.d0,0.d0,0.d0,24.0d0,250.d0,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
0	! NTYPE_ZON

5,140.d0	! NBZ,dZ(mm)
1	! NTYPE_ZON
5,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,7	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
5	! NTYPE_ZON
5,5.d0,0.d0,0.d0,5.d0,5.d0,5,7,5	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXY_ODET,DW_ODET, NBO_ZON,NSBW_ODET,NZS_BD
1	! NTYPE_ZON
5,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,7	! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
0	! NTYPE_ZON
5,349.d0	! NBZ,dZ(mm)
3	! NTYPE_ZON
6,400.d0	! NBZ,dZ
	часть 2 (ДЕТЕКТОР ПУЧКА)
1	! K_RODET
0.02,500.	! PBDEX(Gy/s),Z0BDEX(mm)
	часть 3 (ОБЛАСТИ)
0	! NAREA_DET
	часть 4 (ОЧАГОВАЯ ДОЗА)
0	! NPR_FD
	часть 5 (ВРАЩЕНИЕ)
0	! N_ROT
	часть 6 (ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА)
1.0	! DSMPER
0	! NEPG
1	! NANOSR
0	! NZ_POGL
-1,1,0.08,100,1,90.,90	! NXYE_PART,NZ_XYEPART,EMAX_XYE,NINT_XYE, NTSP_XYE,UMAX_XYU,NINT_XYU
	часть 7 (ПОЛЕ)
0	! NPR_FIELD_PH
	часть 8 (ИСТОРИИ)
1000000	! NISTM
100000	! NIST_PR
0	! ITZAD
	часть 9 (ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК)
0	! NP_ISTDAT
	часть 10 (ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ)
0,5	! NP_YXDOSE,NZSL
1	! NPR1_NDP
0	! NPR2_NDP
	часть 11 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)
phan_istcalc	! nameist
ther15_20.dat	! name file data
136.d0,1.0d0	! Z0,Q0
6	! NP0

## часть 1 ГЕОМЕТРИЯ (есть во всех задачах)

- 1) [theratron.fce] – имя файла, рассчитанного программой CONST, с расширением "fce" (см. меню CONST → Help CONST).
- 2) [TITLE:...]
- 3) [TITLE...] – две строки с кратким описанием файла (max 100 символов в каждой).
- 4) [11,19,5,20,15,2,7 !NCFIG] – номера цвета веществ, которыми они отображаются на экране. Их количество должно быть не менее числа веществ, для которых рассчитан файл констант с расширением "fce" программой CONST (см. пункт 1). Цвета и их номера можно увидеть через раздел меню "Palette".
- 5) [5 !NBZ\_NO] – номер вещества, которое не надо отображать на схеме облучения в геометрии 3. (См. примечание к 1-му примеру.)
- 6) [250.d0 !XY\_MAX(mm)] – max размер всех зон (всей схемы облучения) по X и Y от оси Z. Задается в мм. (См. примечание к 1-му примеру).
- 7) [200,101,101 !NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET] NLAY\_Z – число слоев ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА по Z (max=1000), NX\_DET, NY\_DET – число интервалов ОД по X, Y (max=1000 по каждой оси). См. примечание к 1-му примеру!
- 8) [17 !LZ] – число всех зон схемы облучения по Z. См. примеч. к 1-му примеру!
- 9) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 1-й зоны. Пустая (простая) зона.
- 10) [2,20.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.
- 11) [2 !NTYPE\_ZON] – тип 2-й зоны. Зона с кругом.
- 12) [2,10.d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO\_ZON] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z (мм); OXO, OYO – координаты центра круга в пл. XY зоны (мм); RKR – радиус круга (мм); NBO\_ZON – номер вещества области круга.
- 13) [2 !NTYPE\_ZON] – тип 3-й зоны. Зона с кругом.
- 14) [2,10.d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO\_ZON] См. (12)
- 15) [2 !NTYPE\_ZON] – тип 4-й зоны. Зона с кругом.
- 16) [2,0.8d0,0.d0,0.d0,9.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RKR,NBO\_ZON] См. (12)
- 17) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 5-й зоны. Пустая зона.
- 18) [5,25.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.
- 19) [6 !NTYPE\_ZON] – тип 6-й зоны. Зона с конусом.
- 20) [4,60.d0,0.d0,0.d0,14.d0,26.5d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,RCON1,RCON2,NBO\_ZON] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z (мм); OXO, OYO – координаты оси конуса в пл. XY зоны (мм); RCON1, RCON2 – радиусы окружностей конуса (мм). RCON1 по Z в начале зоны, RCON2 – в конце, RCON2 > RCON1; NBO\_ZON – номер вещества области конуса.
- 21) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 7-й зоны. Пустая зона.
- 22) [5,25.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.
- 23) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 8-й зоны. Зона с прямоугольником.
- 24) [2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,14.7d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z (мм); OXO,

OYO – координаты центра прямоугольника (мм) в пл. XY зоны; DXP,DYP – размеры прямоугольника по X и Y (мм) от его центра; NBO\_ZON – номер вещества области прямоугольника.

25) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 9-й зоны. Зона с прямоугольником.

26) [2,25.d0,0.d0,0.d0,16.0d0,250.d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

27) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 10-й зоны. Зона с прямоугольником.

28) [2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,17.3d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

29) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 11-й зоны. Зона с прямоугольником.

30) [2,25.d0,0.d0,0.d0,18.7d0,250.d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

31) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 12-й зоны. Зона с прямоугольником.

32) [2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,20.0d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

33) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 13-й зоны. Зона с прямоугольником.

34) [2,25.d0,0.d0,0.d0,21.3d0,250.d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

35) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 14-й зоны. Зона с прямоугольником.

36) [2,25.d0,0.d0,0.d0,250.d0,22.6d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

37) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 15-й зоны. Зона с прямоугольником.

38) [2,25.d0,0.d0,0.d0,24.0d0,250.d0,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

39) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 16-й зоны. Пустая зона.

40) [5,140.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.

41) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 17-й зоны. Зона с прямоугольником.

42) [5,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,7 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]  
См. (24)

43) [5 !NTYPE\_ZON] – тип 18-й зоны. Зона с квадратным детектором пучка (программным).

44) [5,5.d0,0.d0,0.d0,5.d0,5.d0,5,7,5 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXY\_ODET,DW\_ODET,NBO\_ZON,NSBW\_ODET,NZS\_BD] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z; OXO,OYO – координаты центра квадрата (мм) в пл. XY зоны; DXY\_ODET – размеры рабочей области ДП по X и Y (мм); DW\_ODET – толщина стенки ДП (мм); NBO\_ZON – номер вещества рабочей области ДП; NSBW\_ODET – номер вещества стенки ДП; NZS\_BD – номер 1-й зоны по Z за областью источника (необходим для определения расстояния до источника).

*Расстояния расчетного и реального ДП могут не совпадать.*

45) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 19-й зоны. Зона с прямоугольником.

46) [5,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,7 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]См. (24)

47) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 20-й зоны. Пустая зона.

48) [5,349.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.

49) [3 !NTYPE\_ZON] – тип 21-й зоны. Вся зона ОСНОВНОЙ ДЕТЕКТОР.

50) [6,400.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z. В данной задаче ОД необходим.

часть 2 ДЕТЕКТОР ПУЧКА (Здесь есть)

51) [1 !K\_RODET] – признак присутствия РЕАЛЬНОГО ДП: 0–нет; 1–есть.

52) [0.02,500. !PBDEX(Gy/s),Z0BDEX(mm)] PBDEX – мощность дозы реального детектора пучка (Гр/с); расстояние от источника до ДП (мм). ДП задается в 1-й части при вводе информации о зонах. Если ДП не задан, то эта информация (любая) в дальнейшем не учитывается.

*Если задан расчетный ДП, то должен быть задан и реальный ДП. Если расчетный ДП не задан, то не должен присутствовать и реальный ДП.*

часть 3 ОБЛАСТИ (здесь их НЕТ, см. пример 3)

53) [0 !NAREA\_DET] – число заданных внутренних областей детектора. 0 – НЕТ заданных областей в детекторе.

часть 4 ОЧАГОВАЯ ДОЗА (здесь НЕТ, см. пример 3)

54) [0 !NPR\_FD] – признак: 0 – не учитывать, 1 – учитывать информацию об очаговой (фокальной) дозе. Здесь не учитывается.

часть 5 ВРАЩЕНИЕ (здесь НЕТ, см. пример 4)

55) [0 !N\_ROT] – признак вращения излучения источника: 0 – нет, 1 – есть. Здесь вращения источника НЕТ.

часть 6 ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА (есть во всех задачах)

56) [1.0 !DSMPER] DSMPER – коэффициент, который позволяет уменьшать величину отрезка траектории заряженных частиц при пересечении границы зоны. Это позволяет более точно рассчитывать характеристики поля излучения вблизи границы раздела сред.  $0.25 \leq DSMPER \leq 1$ . Уменьшение DSMPER увеличивает время счета.

57) [0 !NEPG] NEPG – признак поглощения фотонов при  $E < E_{min}$  (0 – нет, 1 – да). НЕТ(0) – оставшаяся энергия фотона не добавляется к поглощенной энергии.

58) [1 !NANOSR] NANOSR – признак (0–нет; 1–да) для аналитического осреднения поглощенной энергии фотонов в основном детекторе (1–НЕАНАЛОГОВОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ФОТОНОВ). Зачем нужно, достоинства и недостатки см. файл PCLAB\_medphys.doc в папке ...\PCLAB\DOC.

59) [0 !NZ\_POGL]– число зон по Z, где возможно дополнительное поглощение частиц. Описание см. пример 1.

60) [-1,1,0.08,100,1,90.,90 !NXYE\_PART,NZ\_XYEPART,EMAX\_XYE,NINT\_XYE,NTSP\_XYE,UMAX\_XYU,NINT\_XYU] (см. (31) в 1-м примере).

часть 7 ПОЛЕ (здесь НЕТ, см. файл 16 примера)

61) [0 !NPR\_FIELD\_PH]NPR\_FIELD\_PH– ризнак наличия электрического/магнитного поля в зонах: 0– ЕТ, 1– СТЬ. В зонах с детекторами поля НЕТ!

Ввод дополнительных данных см. описание 1-го примера.

часть 8 ИСТОРИИ (есть во всех задачах)

62 [1000000 !NISTM] – максимальное число историй (любое число).

63 [100000 !NIST\_PR] – число историй, после моделирования которых происходят периодические(промежуточные) выдачи результатов расчета в специаль-

ный файл (... \PCLAB\PHANTOM\res\_prom.ftm).

64 [0 !ITZAD] – время задержки (мсек) перед построением очередного элемента траектории частиц на экране. 0 – нет задержки. (См. примечание к 1-му примеру).

часть 9 ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК

65 [0 !NP\_ISTDAT] – признак расчета характеристик плоского источника(ПИ): 1 – считать, 0 – нет. См. примечание к 1-му примеру!

часть 10 ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ (есть во всех задачах)

66) [0,5 !NP\_YXDOSE,NZSL]NP\_YXDOSE – признак создавать(1) не создавать(0) файл с YX распределением поглощенной дозы в Z-слое ОД, NZSL – номер слоя ОД по Z, для которого создается YX распределение дозы ( только для ОДНОГО слоя). Если NP\_YXDOSE = 1, то необходимо добавить строку с именем файла (не более 20 символов) см. exampl\_12.

67) [1 !NPR1\_NDP] 0 – не выдавать, 1 – выдавать распределение дозы в детекторе вдоль оси Z пучка.

68) [0 !NPR2\_NDP] 0 – не выдавать, 1 – выдавать результаты расчета для медицинского анализа: дозы в областях, очаговая доза и т.д.

часть 11 ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ (есть во всех задачах)

69) [phan\_istcalc !nameist] – начало ввода характеристик источника задачи.

Структуру этих данных см. меню "Sources". Здесь ПРЕДВАРИТЕЛЬНО РАС- СЧИТАННЫЙ ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК (ПИ).

### Файл exampl\_3.dfm

ЗАДАЧА: расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник Co-60 в конусе  $\vartheta=4^\circ$ . Поперечные размеры детектора  $170 \times 170 \text{ мм}^2$ , РИП, 650мм, облучение статическое 1 направление. Присутствует опорный детектор.

В детекторе выделены 4 области, 1-я – это внешняя граница среза тела.

Главная цель данной задачи заключается не в расчете распределения дозы. Области можно перемещать и необходимо переместить их так, чтобы границы внешней области соприкасались с границами детектора затем, закончив расчет, можно изменить начальные данные, минимизировав поперечные размеры детектора. Для этого надо использовать новые данные границы внешней области, которые сохраняются в файле результатов.

Так была подготовлена геометрия 4 примера.

входные данные exampl\_3.dfm

часть 1 (ГЕОМЕТРИЯ)

phantom.fce

TITLE: Распределение погл. энергии в срезе тела. Co-60 в конусе 4гр., X/Y max  $170 \times 170 \text{ мм}^2$ ,

TITLE: 650мм воздух + 240мм вода, 4 области, облучение статическое 1 направление.

7,2,8,19,5,20,3,4,6

! NCFIG

1

! NBZ\_NO

85.d0

! XY\_MAX(mm)

120,85,85

! NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET

8

! LZ

1

! NTYPE\_ZON

5,100.d0,0.d0,0.d0,50.d0,50.d0,1 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON  
1 ! NTYPE\_ZON  
5,20.d0,0.d0,0.d0,8.33d0,8.33d0,1 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON  
0 ! NTYPE\_ZON  
1,380.d0 ! NBZ,dZ(mm)  
1 ! NTYPE\_ZON  
1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON  
5 ! NTYPE\_ZON  
1,5.d0,0.d0,0.d0,5.d0,5.d0,1,3,1 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXY\_ODET,DW\_ODET,  
NBO\_ZON,NSBW\_ODET,NZS\_BD  
1 ! NTYPE\_ZON  
1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON  
0 ! NTYPE\_ZON  
1,270.d0 ! NBZ,dZ(mm)  
3 ! NTYPE\_ZON  
2,240.d0 ! NBZ,dZ  
  
часть 2 (ДЕТЕКТОР ПУЧКА)  
1 ! K\_RODET  
0.02,500. ! PBDEX(Gy/s),Z0BDEX(mm)  
  
часть 3 (ОБЛАСТИ)  
4 ! NAREA\_DET  
2 ! NTYPE1\_AREA  
100.,110.,2 ! X1,X2,NTYPE2\_AREA  
5.,5.5,5.7,6.1,7.5,10.,15.,20.,25.,30.,40.,50.,60.,65.,70.,75.,80.,90.,100.,  
110.,120.,130.,140.,150.,160.,170.,180.,190.,200.,210.,220.,225.,230.,233.,  
235.,236.,236.5,236.,235.,232.,230.,227.,225.,221.,218.,215.,210.,205.,200.,  
195.,190.,180.,170.,160.,150.,140.,130.,120.,110.,100.,90.,80.,70.,60.,55.,  
50.,40.,30.,25.,20.,15.,12.5,9.,7.,5./  
100.,105.,110.,115.,120.,127.,135.,141.,146.,150.,155.,160.,162.,163.,163.5,  
163.,162.5,161.,158.,156.,155.,155.,155.5,156.,157.,157.,155.,152.,148.,141.5,  
133.,127.,120.,115.,109.,100.,95.,86.,79.,70.,64.,55.,45.,35.,28.,25.,20.,  
16.,13.,11.,9.5,6.5,5.5,5.,4.5,4.5,6.,6.5,6.7,7.,7.2,7.,7.3,8.,9.5,11.,14.5,  
20.5,26.,34.,49.,60.,70.,80.,90./  
100.,110.,2 ! X1,X2,NTYPE2\_AREA  
31.,32.,33.,36.,42.,45.,50.,55.,60.,65.,70.,75.,80.,85.,90.,95.,100.,105.,  
109.,108.,106.,103.,102.,101.,102.,101.,99.,97.,95.,91.,89.,89.,91.,93.,97.,  
101.,95.,85.,75.,65.,55.,50.,45.,41.,38.,34./  
80.,90.,100.,110.,120.,124.,129.,132.,135.,137.,139.,141.,142.,143.,144.,  
144.,143.,142.,138.,135.,130.,125.,120.,110.,100.,90.,80.,70.,60.,50.,45.,  
40.,35.,30.,25.,22.,23.,24.,26.,30.,36.,41.,48.,55.,60.,70./  
100.,110.,1 ! X1,X2,NTYPE2\_AREA  
117.,78.,16.,50 ! Zo,Yo,R(mm),nt  
100.,110.,2 ! X1,X2,NTYPE2\_AREA  
92.,93.,95.,97.,100.,105.,110.,115.,120.,125.,127.,128.,128.,127.,125.,121.,  
115.,110.,105.,100.,95.,93./  
42.,45.,51.,53.,56.,58.,60.,60.,59.,56.,52.,50.,45.,40.,36.,31.,28.,27.,  
28.,30.,34.,38./

	часть 4 (ОЧАГОВАЯ ДОЗА)
1	! NPR_FD
2.,105.d0,78.d0,117.d0	! FOCDOSE(Gy),X_FD,Y_FD,Z_FD(mm)СКД
	часть 5 (ВРАЩЕНИЕ)
0	! N_ROT
	часть 6 (ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА)
1.0	! DSMPER
1	! NEPG
0	! NANOSR
0	! NZ_POGL
-1,1,0.08,100,1,90.,90	! NXYE_PART,NZ_XYEPART,EMAX_XYE,NINT_XYE, NTSP_XYE,UMAX_XYU,NINT_XYU
	часть 7 (ПОЛЕ)
0	! NPR_FIELD_PH
	часть 8 (ИСТОРИИ)
10000000	! NISTM
10000	! NIST_PR
0	! ITZAD
	часть 9 (ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК)
0	! NP_ISTDAT
	часть 10 (ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ)
0,5	! NP_YXDOSE,NZSL
1	! NPR1_NDP
0	! NPR2_NDP
	часть 11 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)
phan_ist	! nameist
1	! NGIST
1	! NUIST
0	! NP0
1.25d0	! E0
0.d0,0.d0	! teta,fi
0.d0,0.d0,0.d0	! X0,Y0,Z0 (mm)
1.d0	! Q0
5.0	! RIS(mm)
4.0	! UGR

---

описание exampl\_3.dfm

---

часть 1 ГЕОМЕТРИЯ (есть во всех задачах)

1) [phantom.fce] – имя файла констант, рассчитанного программой CONST, с расширением "fce" (см. меню CONST->Help CONST).

2) [TITLE:...]

3) [TITLE:..] две строки с кратким описанием файла (max 100 символов в каждой).

4) [7,2,8,19,5,20,3,4,6 !NCFIG] – номера цвета веществ, которыми они отображаются на экране. Их количество должно быть не менее числа веществ, для которых рассчитан файл констант с расширением "fce" программой CONST(см. пункт 1). Цвета и их номера можно увидеть через раздел меню "Palette".

5) [1 !NBZ\_NO] – номер вещества, которое не надо отображать на схеме облучения в геометрии 3. В этом случае 3х мерный рисунок может выглядеть более

подробно. См. примечание к 1-му примеру!

6) [85.d0 !XY\_MAX(mm)] – max размер всех зон (всей схемы облучения) по X и Y от оси Z. Задается в мм. См. примечание к 1-му примеру!

7) [120,85,85 !NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET] NLAY\_Z – число слоев ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА по Z (max=1000), NX\_DET, NY\_DET – число интервалов ОД по X,Y (max=1000 по каждой оси). См. примечание к 1-му примеру!

8) [8 !LZ] – число всех зон схемы облучения по Z. См. примечание к 1-му примеру!

9) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 1-й зоны. Зона с прямоугольником.

10) [5,100.d0,0.d0,0.d0,50.d0,50.d0,1 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]

NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z (мм); OXO, OYO – координаты центра прямоугольника (мм) в пл. XY зоны; DXP,DYP – размеры прямоугольника по X и Y(мм) от его центра; NBO\_ZON – номер вещества области прямоугольника.

11) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 2-й зоны. Зона с прямоугольником.

12) [5,20.d0,0.d0,0.d0,8.33d0,8.33d0,1 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON] См. (10)

13) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 3-й зоны. Пустая (простая) зона.

14) [1,380.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.

15) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 4-й зоны. Зона с прямоугольником.

16) [1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]

См. (10)

17) [5 !NTYPE\_ZON] – тип 5-й зоны. Зона с квадратным детектором пучка (программным).

18) [1,5.d0,0.d0,0.d0,5.d0,5.d0,1,3,1 !NBZ, dZ,OXO, OYO, DXY\_ODET, DW\_ODET, NBO\_ZON,NSBW\_ODET,NZS\_BD] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z; OXO,OYO – координаты центра квадрата(мм) в пл. XY зоны; DXY\_ODET – размеры рабочей области ДП по X и Y (мм); DW\_ODET – толщина стенки ДП (мм); NBO\_ZON – номер вещества рабочей области ДП; NSBW\_ODET – номер вещества стенки ДП; NZS\_BD – номер 1-й зоны по Z за областью источника (необходим для определения расстояния до источника). См. примечание ко 2-му примеру!

19) [1 !NTYPE\_ZON] – тип 6-й зоны. Зона с прямоугольником.

20) [1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]

См. (10)

21) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 7-й зоны. Пустая (простая) зона.

22) [1,270.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.

23) [3 !NTYPE\_ZON] – тип 8-й зоны. Вся зона ОСНОВНОЙ ДЕТЕКТОР.

24) [2,240.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.

часть 2 ДЕТЕКТОР ПУЧКА (Здесь есть)

25) [1 !K\_RODET] – признак присутствия РЕАЛЬНОГО ДП: 0–нет; 1–есть.

26) [0.02,500. !PBDEX(Gy/s),Z0BDEX(mm)] PBDEX – мощность дозы реального детектора пучка (Гр/с); расстояние от источника до ДП (мм). ДП задается в 1-й части при вводе информации о зонах. Если ДП не задан, то эта информация

(любая) в дальнейшем не учитывается. См. примечание ко 2-му примеру!  
часть 3 ОБЛАСТИ (здесь ЕСТЬ)

27) [4 !NAREA\_DET] – число заданных внутренних областей детектора (4).  
MAX число областей = 10.

Области в детекторе это, например, весь срез тела, определенные области (органы) в нем, в том числе и область опухоли. В них вычисляется и выдается величина дозы.

### ВНИМАНИЕ!

Самая большая (внешняя) область должна быть ПЕРВОЙ!

Так как элементарной ячейкой информации является воксел, то точность описания любой области зависит от размеров воксела. Это можно видеть на экране при вводе данных.

28) [2 !NTYPE1\_AREA] – признак где заданы области 1–в пл. YX, 2–в пл. YZ.

*Все области должны задаваться в одном сечении либо в пл. YX, либо в пл. YZ.*

29) [100.,110.,2 !X1,X2,NTYPE2\_AREA] X1, X2 (мм) – начало и конец 1-й области вдоль оси X (X2-X1 это ее толщина); NTYPE2\_AREA – тип области: 1–круг, 2–многоугольник (полигон). Здесь полигон.

30) [5.,5.5,5.7,.../] – Z координаты (мм) точек полигона 1-й области (если область задана в пл. YX, то должны быть X координаты). Массив значений должен заканчиваться символом слэша "/".

31) [100.,105.,110.,.../] – Y координаты (мм) точек полигона 1-й области (для обоих сечений). Массив значений должен заканчиваться символом слэша "/".

MAX число точек полигона области = 100.

MAX число слоев, которые может занимать одна область = 10.

Значения координат точек полигона любой области снимаются с рисунка среза тела любым способом. Эти значения должны воспроизводить замкнутую кривую. Координаты всех областей должны сниматься с одного рисунка. Начало 2-х мерной декартовой системы координат рисунка должно находиться в левом нижнем углу. Поперечные размеры детектора задаются в соответствии с размерами внешней области, которая соответствует внешней границе тела.

32) [100.,110.,2 !X1,X2,NTYPE2\_AREA] X1, X2 (мм) – начало и конец 2-й области вдоль оси X; NTYPE2\_AREA – тип области: 2 – многоугольник (полигон).

33) [31.,32.,33.,.../] – Z координаты (мм) точек полигона 2-й области.

34) [80.,90.,100.,.../] – Y координаты (мм) точек полигона 2-й области.

35) [100.,110.,1 !X1,X2,NTYPE2\_AREA] X1, X2 (мм) – начало и конец 3-й области вдоль оси X; NTYPE2\_AREA – тип области: 1 – круг.

36) [117.,78.,16.,50 !Zo,Yo,R(mm),nt] Zo, Yo (мм) – центр круга; R(мм) – радиус круга; nt – число точек, которыми будет описан круг (MAX=100).

*Круг затем представляется как полигон.*

37) [100.,110.,2 !X1,X2,NTYPE2\_AREA] X1, X2 (мм) – начало и конец 4-й области вдоль оси X; NTYPE2\_AREA – тип области: 2- многоугольник (полигон).

38) [92.,93.,95.,.../] – Z координаты (мм) точек полигона 4-й области.

39) [42.,45.,51.,.../] – Y координаты (мм) точек полигона 4-й области.

часть 4 ОЧАГОВАЯ/ФОКАЛЬНАЯ ДОЗА ФД (здесь ЕСТЬ)

40) [1 !NPR\_FD] – признак: 0- не учитывать, 1-учитывать информацию об очаговой (фокальной) дозе (ФД). Здесь учитывать.

41) [2.,105.d0,78.d0,117.d0 !FOCDOSE,X\_FD,Y\_FD,Z\_FD] FOCDOSE – величина ФД (Гр); X\_FD,Y\_FD,Z\_FD – координаты ФД (мм) в системе координат ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА.

*Очаговая доза задается в определенной точке внутри ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА. Рассчитывается и выдается доза в вокселе, в котором находится эта точка.*

часть 5 ВРАЩЕНИЕ (здесь НЕТ, см. пример 4)

42) [0 !N\_ROT] – признак вращения излучения источника: 0 – нет, 1 – есть.

Здесь вращения источника НЕТ.

часть 6 ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА (есть во всех задачах)

43) [1.0 !DSMPER] DSMPER – коэффициент, который позволяет уменьшать величину отрезка траектории заряженных частиц при пересечении границы зоны. Это позволяет более точно рассчитывать характеристики поля излучения вблизи границы раздела сред.  $0.25 \leq DSMPER \leq 1$ . Уменьшение DSMPER увеличивает время расчета.

44) [1 !NEPG] NEPG – признак поглощения фотонов при  $E < E_{min}$  (0–нет, 1–да). НЕТ(0) – оставшаяся энергия фотона не добавляется к поглощ-й энергии. Здесь 1 – добавляется.

45) [0 !NANOSR] NANOSR – признак (0–нет; 1–да) для аналитического осреднения поглощенной энергии фотонов в основном детекторе (1 – НЕАНАЛОГОВОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ФОТОНОВ). Зачем нужно, достоинства и недостатки см. файл PCLAB\_medphys.doc в папке ...\PCLAB\DOC.

46) [0 !NZ\_POGL]– число зон по Z, где возможно дополнительное поглощение частиц. Описание см. пример 1.

47) [-1,1,0.08,100,1,90.,90 !NXYE\_PART,NZ\_XYEPART,EMAX\_XYE,NINT\_XYE,NTSP\_XYE,UMAX\_XYU,NINT\_XYU] (см. (31) в 1-м примере).

часть 7 ПОЛЕ (здесь НЕТ, см. файл 16 примера)

48) [0 !NPR\_FIELD\_PH]NPR\_FIELD\_PH– ризнак наличия электрического/магнитного поля в зонах: 0– ЕТ, 1– СТЬ. В зонах с детекторами поля НЕТ!

Ввод дополнительных данных см. описание 1-го примера.

часть 8 ИСТОРИИ (есть во всех задачах)

49) [1000000 !NISTM] – максимальное число историй (любое число).

50) [10000 !NIST\_PR] – число историй, после моделирования которых происходят периодические (промежуточные) выдачи результатов расчета в специальный файл (...\PCLAB\PHANTOM\res\_prom.ftm).

51) [0 !ITZAD] – время задержки (мсек) перед построением очередного элемента траектории частиц на экране. 0 – нет задержки. См. примечание к 1-му примеру!

часть 9 ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК

52) [0 !NP\_ISTDAT] – признак расчета характеристик плоского источника(ПИ): 1– считать, 0– нет. См. примечание к 1-му примеру!

часть 10 ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ (есть во всех задачах)

53) [0,5 !NP\_YXDOSE,NZSL]NP\_YXDOSE – признак создавать (1) не создавать (0) файл с YX распределением поглощенной дозы в Z-слое ОД, NZSL – номер слоя ОД по Z, для которого создается YX распределение дозы (только для ОДНОГО слоя). Если NP\_YXDOSE = 1, то необходимо добавить строку с именем файла (не более 20 символов) см. exampl\_12.

54) [1 !NPR1\_NDP] 0 – не выдавать, 1 – выдавать распределение дозы в детекторе вдоль оси Z пучка.

55) [0 !NPR2\_NDP] 0 – не выдавать, 1 – выдавать результаты расчета для медицинского анализа: дозы в областях, очаговая доза и т.д.

часть 11 ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ (есть во всех задачах)

56) [phan\_ist !nameist] – начало ввода характеристик источника задачи.

Структуру этих данных см. меню "Sources". Здесь МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК.

#### Файл exampl\_4.dfm

ЗАДАЧА: расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник Co-60 в конусе 4гр. Поперечные размеры детектора 210·160мм<sup>2</sup>, толщина 232 мм, РИП, 770 мм, облучение статическое 4 направления (вклад каждого 0,25). Присутствует квадратный детектор пучка. В основном детекторе выделены 4 области, 1-я – это внешняя граница среза тела (тело расположено вдоль оси X). Поперечные размеры основного детектора по Z и Y заданы минимальными в соответствии с границей внешней области. Необходимые значения взяты из результатов решения задачи 3. Толщина среза меньше толщины основного детектора.

входные данные exampl\_4.dfm

часть 1 (ГЕОМЕТРИЯ)

phantom.fce

TITLE: Распределение погл. энергии в срезе тела. Co-60 в конусе 4гр., X/Y max 380x380мм<sup>2</sup>,

TITLE: 770мм воздух + 232мм вода, облучение статическое 4 направления равновероятное.

7,2,8,19,20,5,3,4,6

! NCFIG

1

! NBZ\_NO

190.d0

! XY\_MAX(mm)

120,21,85

! NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET

9

! LZ

1

! NTYPE\_ZON

4,100.d0,0.d0,0.d0,50.d0,50.d0,1

! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON

1

! NTYPE\_ZON

5,20.d0,0.d0,0.d0,8.33d0,8.33d0,1

! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON

0

! NTYPE\_ZON

1,375.d0

! NBZ,dZ(mm)

1

! NTYPE\_ZON

1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3

! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON

5

! NTYPE\_ZON

1,5.d0,0.d0,0.d0,5.d0,5.d0,1,3,1

! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXY\_ODET,DW\_ODET,  
NBO\_ZON,NSBW\_ODET,NZS\_BD

```

1 ! NTYPE_ZON
1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
0 ! NTYPE_ZON
1,260.d0 ! NBZ,dZ(mm)
4 ! NTYPE_ZON
1,232.d0,0.d0,0.d0,105.d0,80.d0,2 ! NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO_ZON
0 ! NTYPE_ZON
1,65.d0 ! NBZ,dZ(mm)
часть 2 (ДЕТЕКТОР ПУЧКА)
1 ! K_RODET
0.02,500. ! PBDEX(Gy/s),Z0BDEX(mm)
часть 3 (ОБЛАСТИ)
4 ! NAREA_DET
2 ! NTYPE1_AREA
100.,110.,2 ! X1,X2,NTYPE2_AREA
0.000E+00,4.079E-01,8.157E-01, ... /
9.551E+01,1.004E+02,1.053E+02, ... /
100.,110.,2 ! X1,X2,NTYPE2_AREA
2.610E+01,2.692E+01, ... /
7.551E+01,8.531E+01, ... /
100.,110.,1 ! X1,X2,NTYPE2_AREA
112.16,73.47,16.,50 ! Zo,Yo,R(mm),nt
100.,110.,2 ! X1,X2,NTYPE2_AREA
8.728E+01,8.810E+01, ... /
3.755E+01,4.041E+01, ... /
часть 4 (ОЧАГОВАЯ ДОЗА)
1 ! NPR_FD
2.,105.d0,73.47d0,112.16d0 ! FOCDOSE(Gy),X_FD,Y_FD,Z_FD(mm)СКД
часть 5 (ВРАЩЕНИЕ)
1 ! N_ROT
2 ! NTYPE_ROT
4 ! NPOIT_ROT
0.d0,90.d0,180.d0,-90.d0 ! углы(гр.)
4*0.25d0 ! вероятности
105.d0,73.47d0,112.16d0 ! XD_IZO,YD_IZO,ZD_IZO(mmСКД)
часть 6 (ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА)
1.0 ! DSMPER
1 ! NEPG
0 ! NANOSR
0 ! NZ_POGL
-1,1,0.08,100,1,90.,90 ! NXYE_PART,NZ_XYEPART,EMAX_XYE,NINT_XYE,
NTSP_XYE,UMAX_XYU,NINT_XYU
часть 7 (ПОЛЕ)
0 ! NPR_FIELD_PH
часть 8 (ИСТОРИИ)
100000000 ! NISTM
500000 ! NIST_PR
0 ! ITZAD

```

	часть 9 (ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК)
0	! NP_ISTDAT
	часть 10 (ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ)
0,5	! NP_YXDOSE,NZSL
0	! NPR1_NDP
1	! NPR2_NDP
	часть 11 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)
phan_ist	! nameist
1	! NGIST
1	! NUIST
0	! NP0
1.25d0	! E0
0.d0,0.d0	! tetа,fi
0.d0,0.d0,0.d0	! X0,Y0,Z0(mm)
1.d0	! Q0
5.0	! RIS(mm)
4.0	! UGR

описание exampl\_4.dfm

часть 1 ГЕОМЕТРИЯ (есть во всех задачах)

- 1) [phantom.fce]
- 2) [TITLE:...]
- 3) [TITLE:...]
- 4) [7,2,8,19,20,5,3,4,6 !NCFIG]
- 5) [1 !NBZ\_NO]
 

Описание 1) – 5) – см. предыдущие примеры.
- 6) [190.d0 !XY\_MAX(mm)] – max размер всех зон (всей схемы облучения) по X и Y от оси Z. задается в мм. См. примечание к 1-му примеру!
- 7) [120,21,85 !NLAY\_Z,NX\_DET,NY\_DET] NLAY\_Z – число слоев ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА по Z (max=1000), NX\_DET, NY\_DET – число интервалов ОД по X,Y (max=1000 по каждой оси). См. примечание к 1-му примеру!
- 8) [9 !LZ] – число всех зон схемы облучения по Z. См. примечание к 1-му примеру!
- 9) [1 !NTYPE\_ZON]
- 10) [4,100.d0,0.d0,0.d0,50.d0,50.d0,1 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]
- 11) [1 !NTYPE\_ZON]
- 12) [5,20.d0,0.d0,0.d0,8.33d0,8.33d0,1 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]
- 13) [0 !NTYPE\_ZON]
- 14) [1,375.d0 !NBZ,dZ(mm)]
- 15) [1 !NTYPE\_ZON]
- 16) [1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]
- 17) [5 !NTYPE\_ZON]
- 18) [1,5.d0,0.d0,0.d0,5.d0,5.d0,1,3,1 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXY\_ODET,  
DW\_ODET,NBO\_ZON,NSBW\_ODET,NZS\_BD]
- 19) [1 !NTYPE\_ZON]
- 20) [1,5.d0,0.d0,0.d0,10.d0,10.d0,3 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]
- 21) [0 !NTYPE\_ZON]
- 22) [1,260.d0 !NBZ,dZ(mm)]

- 23) [4 !NTYPE\_ZON]  
24) [1,232.d0,0.d0,0.d0,105.d0,80.d0,2 !NBZ,dZ,OXO,OYO,DXP,DYP,NBO\_ZON]

Описание 9)...24) – см. пример 3.

- 25) [0 !NTYPE\_ZON] – тип 9-й зоны (последняя). Пустая зона.  
26) [1,65.d0 !NBZ,dZ(mm)] NBZ – номер основного вещества зоны; dZ – толщина зоны по Z.

*Эта дополнительная зона из воздуха за ОД необходима для осуществления вращения пучка источника вокруг изоцентра (облучение с нескольких направлений), которое присутствует в этой задаче.*

часть 2 ДЕТЕКТОР ПУЧКА (Здесь есть)

Описание этого раздела см. пример 3.

- 27) [1 !K\_RODET]  
28) [0.02,500. !PBDEX(Gy/s),Z0BDEX(mm)]

часть 3 ОБЛАСТИ (здесь ЕСТЬ)

Описание этого раздела см. пример 3.

- 29) [4 !NAREA\_DET]  
30) [2 !NTYPE1\_AREA]  
31) [100.,110.,2 !X1,X2,NTYPE2\_AREA]  
32) [0.000E+00,4.079E-01,.../]  
33) [9.551E+01,1.004E+02,.../]  
34) [100.,110.,2 !X1,X2,NTYPE2\_AREA]  
35) [9.551E+01,1.004E+02,.../]  
36) [2.610E+01,2.692E+01,.../]  
37) [100.,110.,1 !X1,X2,NTYPE2\_AREA]  
38) [112.16,73.47,16.,50 !Zo,Yo,R(mm),nt]  
39) [100.,110.,2 !X1,X2,NTYPE2\_AREA]  
40) [8.728E+01,8.810E+01,.../]  
41) [3.755E+01,4.041E+01,.../]

часть 4 ОЧАГОВАЯ/ФОКАЛЬНАЯ ДОЗА ФД (здесь ЕСТЬ)

Описание этого раздела см. пример 3.

- 42) [1 !NPR\_FD]  
43) [2.,105.d0,73.47d0,112.16d0 !FOCDOSE,X\_FD,Y\_FD,Z\_FD]

часть 5 ВРАЩЕНИЕ (здесь ЕСТЬ)

- 44) [1 !N\_ROT] – признак вращения излучения источника: 0 – нет, 1 – есть. Здесь вращение ЕСТЬ.

*Вращение всегда происходит в пл. YZ вокруг оси параллельной X.*

- 45) [2 !NTYPE\_ROT] – признак типа вращения: 1 – равномерное (ротационное) от угла U1 до U2; 2 – облучение с заданных направлений (статическое).  
46) [4 !NPOIT\_ROT] – число направлений статического облучения.  
47) [0.d0,90.d0,180.d0,-90.d0 !углы(гр.)] – направления статического облучения.  
48) [4\*0.25d0 !вероятности] – вероятности облучения с каждого направления (любые). Сумма вероятностей = 1.  
49) [105.d0,73.47d0,112.16d0 !XD\_IZO,YD\_IZO,ZD\_IZO(mm)СКД]  
XD\_IZO,YD\_IZO,ZD\_IZO(mm) – координаты изоцентра в системе координат

ОД. Это точка, вокруг которой происходит вращение источника излучения.

*Как правило, это точка, где задана ФД (фокальная/очаговая доза).*

часть 6 ПРИЗНАКИ РАСЧЕТА (есть во всех задачах)

Описание этого раздела см. в предыдущих примерах.

50) [1.0 !DSMPER]

51) [1 !NEPG]

52) [0 !NANOSR]

53) [0 ! NZ\_POGL]– число зон по Z, где возможно дополнительное поглощение частиц. Описание см. пример 1.

54) [-1,1,0.08,100,1,90.,90 ! NXYE\_PART,NZ\_XYEPART,EMAX\_XYE, NINT\_XYE,NTSP\_XYE,UMAX\_XYU,NINT\_XYU] (см. (31) в 1-м примере).

часть 7 ПОЛЕ (здесь НЕТ, см. файл 16 примера)

55) [0 !NPR\_FIELD\_PH]NPR\_FIELD\_PH– ризнак наличия электрическо-го/магнитного поля в зонах: 0– ЕТ, 1– СТЪ. В зонах с детекторами поля НЕТ!

Ввод дополнительных данных см. описание 1-го примера.

часть 8 ИСТОРИИ (есть во всех задачах)

Описание этого раздела см. в предыдущих примерах.

56) [100000000 !NISTM]

57) [500000 !NIST\_PR]– исло историй, после моделирования которых происходят периодические (промежуточные) выдачи результатов расчета в специальный файл (... \PCLAB\PHANTOM\res\_prom.ftm).

58 [0 !ITZAD]

часть 9 ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК (здесь НЕТ)

Описание этого раздела см. в примере 1.

59) [0 !NP\_ISTDAT]

часть 10 ПРИЗНАКИ ПЕЧАТИ (есть во всех задачах)

Описание этого раздела см. в предыдущих примерах.

60) [0,5 !NP\_YXDOSE,NZSL]

61) [0 !NPR1\_NDP]

62) [1 !NPR2\_NDP]

часть 11 ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ (есть во всех задачах)

Описание этого раздела см. в примере 3.

63) [phan\_ist !nameist]

#### **Файл exampl\_5.dfm**

ЗАДАЧА: расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник рентгеновский аппарат с  $U_{max} = 250$  кВ, половина угла раствора конуса пучка 3 гр. Поперечные размеры детектора  $210 \times 160$  мм<sup>2</sup>, толщина 232 мм, РИП, 770 мм, облучение ротационное. Присутствует круглый детектор пучка. В основном детекторе выделены 2 области, 1-я – это внешняя граница среза тела (расположено вдоль оси X).

Смысл входных данных этой задачи описан в примерах 1–4, а подробное описание входных данных см. КЛ раздел меню PHANTOM → Data File.

#### **Файл exampl\_6.dfm**

ЗАДАЧА: расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник – моноэнергетический пучок протонов

с энергией 110 МэВ, половина угла раствора конуса пучка 2 гр. Поперечные размеры детектора  $210 \times 160 \text{ мм}^2$ , толщина 232 мм, РИП= 500мм, облучение статическое с 4-х направлений. Присутствует квадратный детектор пучка, со стенками из тканеэквивалентной пластмассы. В основном детекторе выделены 2 области. 1-я – это внешняя граница среза тела (расположено вдоль оси X), 2-я – опухоль.

Этот пример показывает, что пик Грея расположен в небольшой области пространства и облучение моноэнергетическим пучком даже с нескольких направлений не позволяет перекрыть всю область опухоли.

Смысл входных данных этой задачи описан в примерах 1–4, а подробное описание входных данных см. КЛ раздел меню PHANTOM → Data File.

#### **Файл exampl\_7.dfm**

**ЗАДАЧА:** расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник – пучок протонов с изменяемой энергией в диапазоне 105–135 МэВ с шагом 5 МэВ, половина угла раствора конуса пучка 2 гр. Поперечные размеры детектора  $210 \times 160 \text{ мм}^2$ , толщина 232 мм, РИП = 500мм, облучение статическое с 4-х направлений. Присутствует квадратный детектор пучка, со стенками из тканеэквивалентной пластмассы. В основном детекторе выделены 2 области. 1-я – это внешняя граница среза тела (расположено вдоль оси X), 2-я – опухоль.

Этот пример показывает, что с помощью модуляции энергии пучка и облучения с нескольких направлений можно перекрыть всю область опухоли.

Все входные данные примера 7 (за исключением данных источника) соответствуют примеру 6. Здесь используется специальный источник протонов с изменяемой энергией. Структуру данных источника см. КЛ раздел меню PHANTOM → Sources.

#### **Файл exampl\_8.dfm**

**ЗАДАЧА:** расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник: электронный пучок с  $E = 6 \text{ МэВ}$  и с углом расходимости 1 гр. падает из вакуума на фольгу из W толщиной 0,9 мм. Тормозное излучение (и заряженные частицы) выходят из фольги, проходят слой воздуха толщиной 0,1мм (для ускорения расчета в нем заряженные частицы принудительно поглощаются), проходят свинцовый коллиматор диаметром 20 мм, ограничитель пучка из Pb толщиной 30 мм с прямоугольным отверстием  $30 \times 40 \text{ мм}^2$  (находится на расстоянии 117 мм от фантома) и затем падает на детектор – водный фантом. Поперечные размеры детектора  $210 \times 160 \text{ мм}^2$ , толщина 232 мм, РИП = 650 мм, облучение статическое с 4-х направлений. Присутствует квадратный детектор пучка, стенки которого сделаны из тканеэквивалентной пластмассы. В основном детекторе выделены 2 области. 1-я – это внешняя граница среза тела (расположено вдоль оси X), 2-я – опухоль. Для ускорения расчета используется также аналитическое усреднение поглощенной энергии фотонов в ОД.

Это пример на лучевую терапию с помощью тормозного излучения электронного ускорителя.

**ВНИМАНИЕ!** Для существенного ускорения расчетов необходимо пред-

варительно рассчитать ПЛОСКИЙ ИСТОЧНИК (см. пример 1), например, на выходе из коллиматора и последующий расчет проводить с ПИ, не моделируя перенос излучения в фольге и коллиматоре. Следует помнить, что моделирование электронных траекторий требует гораздо большего времени, чем траекторий фотонов.

Смысл входных данных этой задачи описан в примерах 1–4, а подробное описание входных данных см. КЛ раздел меню PHANTOM → Data File.

#### **Файл exampl\_9.dfm**

**ЗАДАЧА:** расчет мощности дозы на входе в лабиринт. Источник – рентгеновское излучение с  $U_{\max} = 250$  кВ, находится в бункере, излучение падает на одну из стен бункера. Стены бункера и лабиринта выполнены из бетона. Детектор находится перед входом в лабиринт. Он представляет собой тонкий (5 мм) слой воды, разделенный на элементарные области по X и Y.

Это пример, как задать и рассчитать прямоугольный лабиринт.

Смысл входных данных этой задачи описан в примерах 1–4, а подробное описание входных данных см. КЛ раздел меню PHANTOM → Data File.

#### **Файл exampl\_10.dfm**

**ЗАДАЧА:** расчет распределения поглощенной дозы в водном фантоме, имитирующем срез тела. Источник – тормозное излучение с  $E_{\max} = 6$  МэВ, половина угла раствора конуса пучка 5 гр. Поперечные размеры детектора  $210 \times 160 \text{ мм}^2$ , толщина 232 мм, РИП = 500 мм, облучение статическое с 4-х направлений. Присутствует квадратный детектор пучка, со стенками из тканеэквивалентной пластмассы. В основном детекторе выделены 2 области. 1-я – это внешняя граница среза тела (расположена вдоль оси X), 2-я – опухоль. Перед основным детектором находится свинцовый коллиматор толщиной 30 мм с отверстием  $R = 6$  мм.

#### **Файл exampl\_11.dfm**

**ЗАДАЧА:** расчет характеристик прямоугольного плоского источника (ПИ) тормозного излучения для примера exampl\_12. Первичный прямоугольный пучок электронов ( $2 \text{ мм} \times 0,25 \text{ мм}$ ) с энергией 6 МэВ падает на мишень из Ta толщиной 0,25 мм. ПИ с размерами от оси  $2 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$  рассчитывается на расстоянии 59,54 мм от первичного электронного пучка. Фотоны сначала движутся в вакууме, а затем проходят через стекло 2 мм и углерод 13,3 мм.

#### **Файл exampl\_12.dfm**

**ЗАДАЧА:** облучение стандартного эталона чувствительности CERL (две проволоки из платины диаметром 500 мкм и с расстоянием 500 мкм) тормозным излучением с максимальной энергией 6 МэВ. Используется предварительно рассчитанный в предыдущей задаче ПИ. Проволочки задаются с помощью набора слоев с прямоугольными рамками, у которых меняется ширина.

#### **Файл exampl\_13.dfm**

**ПРИМЕР** геометрии с двумя коническими областями (действительная и мнимая часть конуса). Источник – рентгеновское излучение  $U_{\max} = 250$  кВ в конусе с половинным углом 15 гр.

### Файл exampl\_14dfm

ЗАДАЧА: получить равномерное в плоскости XY распределение электронов, падающих на детектор. Геометрия – вакуумная камера с четырьмя фольгами из Al для создания равномерного распределения электронов на образце и с медным криостатом. ОД расположен в конце криостата. Источник моноэнергетический пучок электронов с энергией 80 кэВ, расходящийся в конусе с половинным углом 17 град. Рассчитывается X,Y распределение и спектр частиц, падающих на 1-й слой ОД.

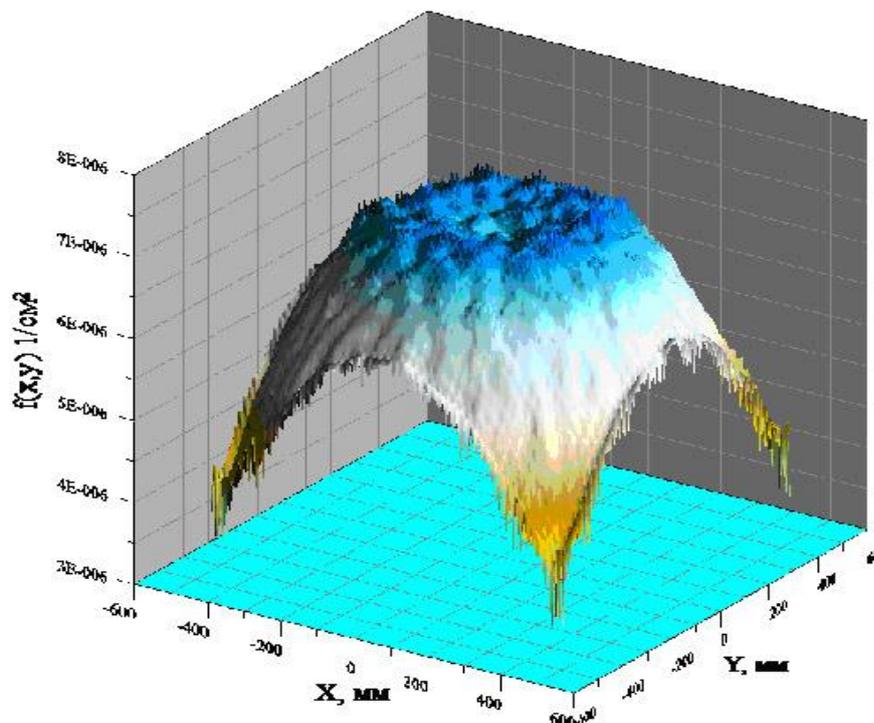


Рис. 3.7.5. Плотность электронов, падающих на образец.  
(3-D поверхность плотности падающих электронов на ОД, построена в программе GRAPHER, из файла exampl\_14.dat примера 14)

### Файл exampl\_15dfm

ЗАДАЧА: показать пример с различным расположением цилиндров в зоне. Рентгеновский коллимированный с  $U_{\text{max}} = 100$  кВ пучок падает на 4 цилиндра, из дерева, которые находятся в 4-х последовательных зонах из воздуха. Цилиндры расположенных по разному в зонах. Детектор 1 мм воды

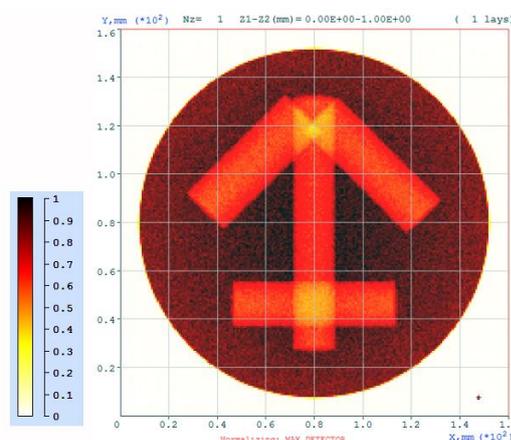


Рис. 3.7.5. 2D распределение поглощенной энергии в детекторе

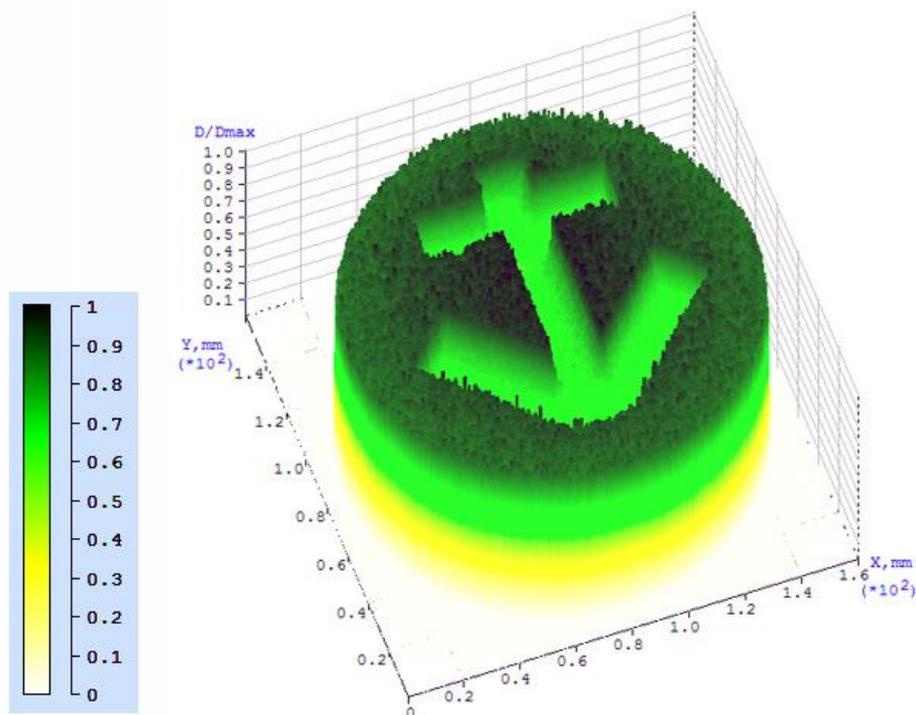


Рис. 3.7.6. 3D распределение поглощенной энергии в детекторе

#### Файл exampl\_16dfm

ЗАДАЧА: показать пример расчета с наличием электрического и магнитного поля в зонах. Коллимированный пучок электронов с энергией 70 кэВ через патрубков входит в вакуумную камеру, проходит рассеивающую фольгу, затем проходит отверстие круглого постоянного магнита и падает на детектор (1 мм NaI). В 4-й зоне электрическое и магнитное поле, в 5-й зоне с постоянным магнитом – магнитное поле, различное в разных областях зоны.

#### Файл exampl\_17dfm

ЗАДАЧА: пример расчета с наличием сферических областей в зонах. Рентгеновский коллимированный пучок с  $U_{max} = 100$  кВ проходит через 3 зоны с шаровыми объектами. Детектор 1 мм NaI.

#### Файл exampl\_18dfm

ЗАДАЧА: пример расчета сложного лабиринта (расчет мощности дозы на входе в лабиринт). Коллимированный пучок тормозного излучения с  $E_{max}=1$ МэВ падает на стену бетонного бункера. Для входа в бункер проектируется бетонный лабиринт. Для определения толщины входной защитной двери необходимо знать мощность эквивалентной дозы на входе в лабиринт. Детектором является слой воды толщиной 5 мм.

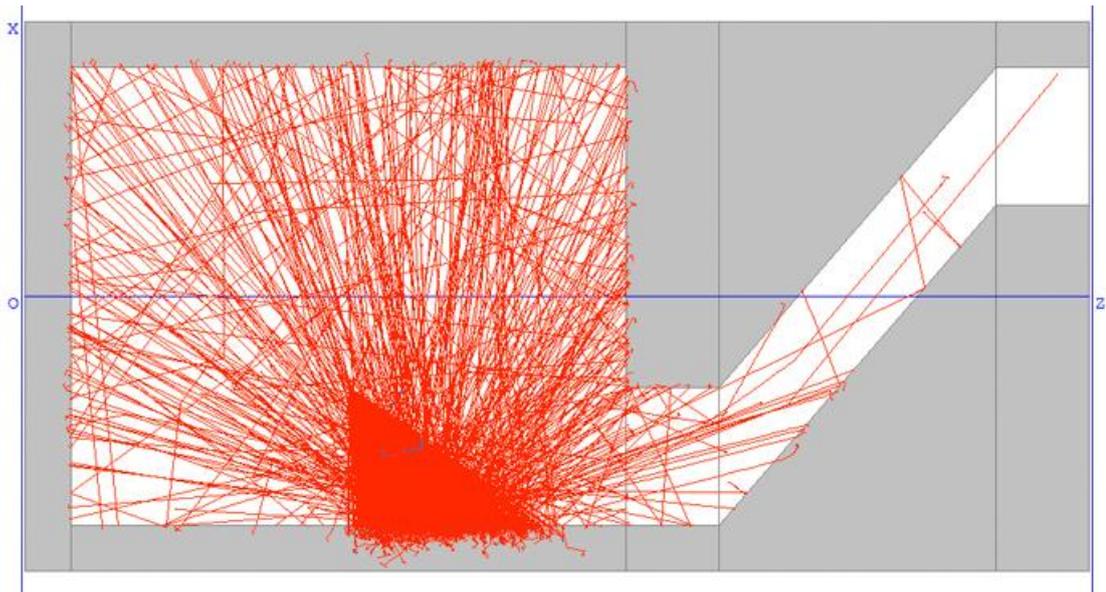


Рис. 3.7.7. Рисунок лабиринта

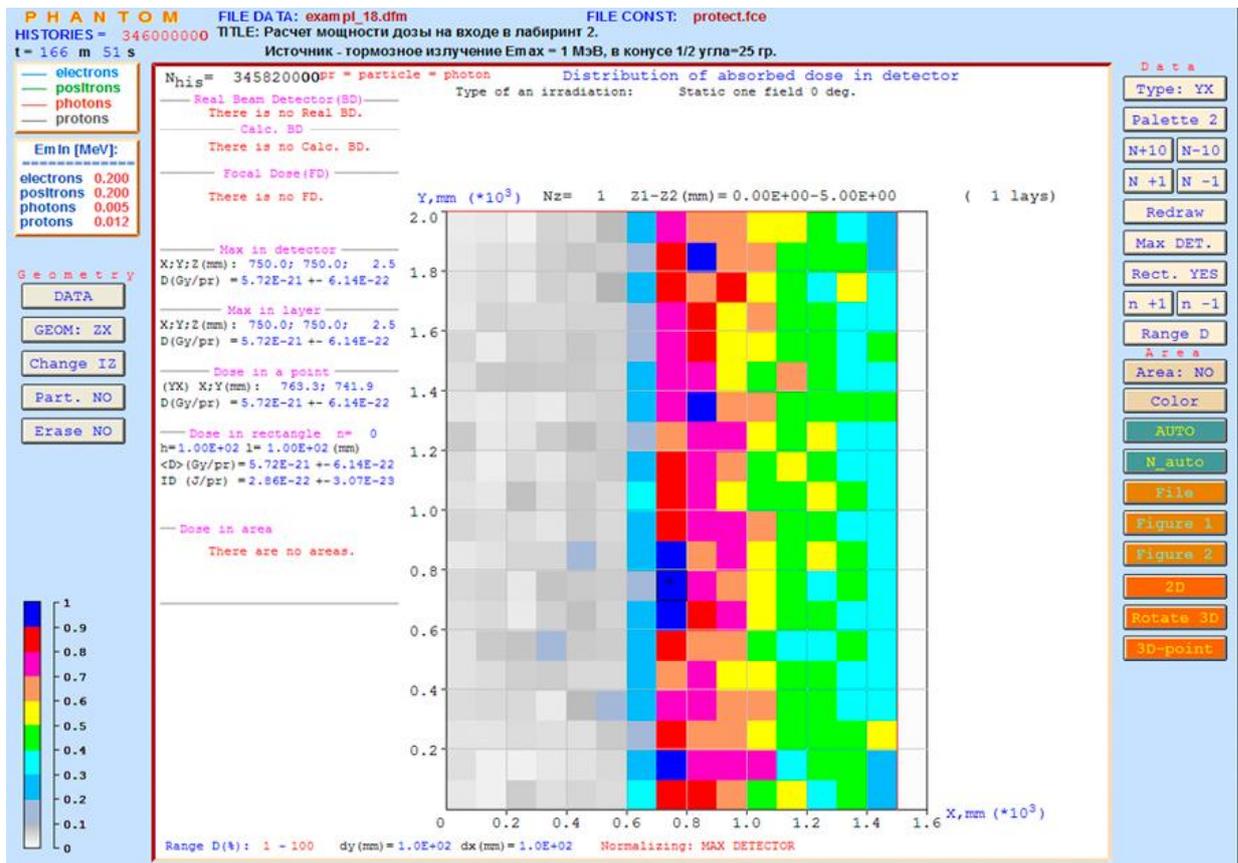


Рис. 3.7.8. Результат расчета. Распределение дозы на входе в лабиринт. Размер входа 150\*200 см, размер прямоугольной области 10\*10 см. Приведена максимальная доза

### Файл exampl\_19dfm

ЗАДАЧА: пример геометрии с двумя параллелепипедами 2 типа. В одной зоне – это пластина из Рb, повернутая на угол +70 гр. относительно оси Z, в другой – слой из воды, повернутый на угол – 60 гр. относительно оси Z. Источник – электронный пучок с  $E = 10$  МэВ, коллимированный в конусе с  $1/2$  угла = 2 гр. Детектором является слой воды толщиной 5 мм.

## Файл exampl\_20dfm

**ЗАДАЧА:** пример геометрии вакуумной камеры с двумя точечными изотропными источниками, находящимися в разных точках и работающими одновременно. Энергии электронов у источников 300 кэВ и 70 кэВ, оба коллимированы в конусе с  $1/2$  угла = 25 гр. Оси пучков повернуты к оси Z. Электроны падают сначала на Al фольги и после рассеяния на детектор. Детектором является слой Si толщиной 3 мм.

### 3.7.4. Структура данных в окне результатов режима PHANTOM

(См. рис. 2.10)

В режиме PHANTOM результаты расчета распределения поглощенной дозы в детекторе, усредненной в пределах 1 воксела, могут выводиться на экран. В зависимости от решаемой задачи в графическое окно выдается разная информация.

#### I) ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В правую часть графического окна выводится распределение поглощенной дозы, которое отображается в виде окрашенных прямоугольных областей, размеры которых соответствуют сечению вокселей – минимальные объемы для поглощенной энергии. Размеры вокселей определяются входными данными задачи. Результаты выдаются в 2-х проекциях: а) YX – последовательно можно просмотреть все слои детектора в пл. YX, перпендикулярной оси Z геометрии расчета; б) YZ – последовательно можно просмотреть все слои детектора в пл. YZ, параллельной оси Z геометрии расчета.

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОЖНО ВЫВОДИТЬ В 2D И 3D РЕЖИМАХ, НО БОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫМ ЯВЛЯЕТСЯ 2D. НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ РИСУНКА В 3D ОТСУТСТВУЮТ (см. описание кнопок).**

Вверху над рисунком указывается номер слоя, его положение и число всех слоев в данной проекции. Внизу под рисунком указываются: диапазон по дозе, в котором выводятся результаты; перечные размеры воксела в мм (в соответствующей проекции); тип нормировки результатов. Для 3D рисунка указываются его углы поворота относительно осей Z и X.

Слева внизу всего окна показывается используемая цветовая палитра с разметкой ее интенсивности (или цвета) в зависимости от величины дозы. Интенсивность цвета рисунка можно менять в зависимости от типа нормировки результата – на максимальное значение во всем детекторе или на максимальное значение в данном слое.

В зависимости от решаемой задачи на рисунке могут дополнительно выделяться и закрашиваться некоторые области детектора, которые задаются во входных данных. Границы области детектора на 2D рисунке справа и вверху выделяются красными линиями. На 3D рисунке выводится только область детектора.

#### II) ИНФОРМАЦИОННАЯ ЧАСТЬ

В самом верху окна слева указывается число историй, для которых построены результаты. Далее указан тип нормировки (на 1 частицу источника или на 1 распад) и тип частиц. Например, pr = particle = photon –нормировка на

1 фотон источника. Далее написано, что изображено – распределение поглощенной дозы в детекторе. Ниже указывается тип облучения, например, static one field 0 deg. – статическое, одно поле, 0 гр. (вдоль оси Z рассчитываемой геометрии).

Основная информация помещается слева от рисунка. Она выводится вместе со статистической погрешностью расчета, в качестве которой приводится 1 средне квадратическое отклонение.

### 1) Real Beam Detector(BD)

Здесь находится информация о ДЕКТЕКОРЕ ПУЧКА/ОПОРНОМ ДЕКТЕКОРЕ(ДП/BD) реального аппарата. ЕСЛИ ОН ЗАДАН!

SBD(cm) – расстояние от источника;

PBD (Gy/s) – мощность дозы.

### 2) Calc. BD

Здесь находится информация о РАСЧЕТНОМ ДЕКТЕКОРЕ ПУЧКА, показание которого рассчитывается при моделировании. ЕСЛИ ОН ЗАДАН!

***Детекторы пучка реальный и расчетный должны задаваться или оба, или не задаваться.***

Zo (cm) – расстояние от источника;

P<sub>0</sub> (Гр/с) – мощность дозы, которую он должен иметь в соответствии с реальным аппаратом. PBD и P<sub>0</sub> могут различаться только по причине различных расстояний от источника. P<sub>0</sub> рассчитывается из PBD с учетом геометрического ослабления.

D<sub>0</sub> (Гр/част) – величина дозы в ДП при моделировании с нормировкой на 1 частицу/распад. Связь между мощностью дозы в любом месте основного детектора (ОД) для реального аппарата P<sub>реал</sub> (Гр/с) и рассчитанной дозой D<sub>расч</sub> (Гр/част) дается следующим соотношением:

$$\frac{P_{\text{реал}} (\text{Гр/с})}{P_0 (\text{Гр/с})} = \frac{D_{\text{расч}} (\text{Гр/част})}{D_0 (\text{Гр/част})} \quad (3.8.1)$$

откуда находим «реальную» мощность дозы

$$P_{\text{реал}} (\text{Гр/с}) = P_0 (\text{Гр/с}) \frac{D_{\text{расч}} (\text{Гр/част})}{D_0 (\text{Гр/част})} \quad (3.8.2)$$

Соотношения (3.8.1), (3.8.2) предполагают, что моделирование адекватно отражает спектр, угловое распределение и условия облучения реального аппарата.

Погрешность вычисляется как погрешность косвенных вычислений  $u=x/y$ :

$$du = P_0 \times \frac{\sqrt{(dx)^2 + x^2 \frac{(dy)^2}{y^2}}}{y}, \quad (3.8.3)$$

где  $u = P_{\text{реал}}$ ,  $x = D_{\text{расч}}$ ,  $y = D_0$ . Здесь P<sub>0</sub> – константа.

### 3) Focal Dose (FD/ФД)

Сюда помещается информация о величине ФОКАЛЬНОЙ (ОЧАГОВОЙ) дозы (FD). ЕСЛИ ОНА ЗАДАНА!

FD (Gy) – величина ФД (Гр), задаваемая при реальном облучении; на рисунке результатов место FD отмечается розовым символом (#), если в данный момент на экране отображается соответствующий слой с вокселем ФД;

X: 28 Z: 35 – номера слоев расположения ФД соответственно по X (сечение YZ) и по Z (сечение YX);

X;Y;Z (мм) – координаты т. FD в системе координат ОСНОВНОГО ДЕТЕКТОРА;

D(Gy/pr) – величина дозы при моделировании с нормировкой на 1 частицу/распад;

TFD (s) – необходимое время достижения заданной ФД при данных условиях облучения. В соответствии с (3.8.2) имеем

$$\text{TFD}(c) = \frac{\text{FD}(\text{Гр})}{P_{\text{реал}}(\text{Гр}/c)}, \quad (3.8.5)$$

где  $P_{\text{реал}}$  определяется для воксела ФД.

#### 4) Max in detector

Сюда выводится информация о величине (Гр/част) и месте максимальной дозы в объеме детектора (средняя по объему 1 воксела). Если задана ФД и рассчитывается TFD (см. 3), то оценивается величина дозы в этой т. за время  $t = \text{TFD}$ .  $D(\text{TFD})(\text{Гр})$ .

#### 5) Max in layer

Сюда помещается информация о величине (Гр/част) и месте максимальной дозы в просматриваемом слое детектора (средняя по объему 1 воксела). Если задана ФД и рассчитывается TFD (см. 3), то оценивается величина дозы в этой т. за время  $t = \text{TFD}$ .  $D(\text{TFD})(\text{Гр})$ .

#### 6) Dose in a point

Сюда выводится информация о величине и месте максимальной дозы в определенном вокселе детектора. Для этого надо просто нажать левую кнопку мыши в соответствующей области детектора. Если задана ФД и рассчитывается TFD (см. 3), то оценивается величина дозы в этой т. за время  $t = \text{TFD}$ .  $D(\text{TFD})(\text{Гр})$ .

#### 7) Dose in rectangle $n = x$

Здесь находится информация о дозе в прямоугольной области толщиной в 1 слой, высота (h) и ширина (l) которой кратны размеру 1 воксела соответственно по Y и X. Данные выводятся, если в правом ряду кнопок есть "Rect. YES" (циклическая кнопка). Число прямоугольных областей по h и l указывается индексом n.

$n = 0$  соответствует области только одного воксела. В этом случае результат должен совпадать с "Dose in a point";

$n = 1$  – к центральному прямоугольнику со всех сторон добавляются еще по одному сечению воксела, получаем  $n = 3$  – размеры прямоугольника по h и l. В этом случае выводится средняя доза в области из  $3*3 = 9$  вокселов и т.д.

$\langle D \rangle(\text{Gy/pr})$  – средняя величина дозы в пределах прямоугольника с нормировкой на 1 частицу/распад;

ID(J/pr) – «интегральная доза» (по сути – поглощенная энергия) во всей прямоугольной области (Дж/част);

Если задана ФД и рассчитывается TFD (см. 3), то оценивается величина средней дозы в прямоугольной области за время  $t = \text{TFD}$ .  $\langle \text{DTFD} \rangle(\text{Гр})$  и величина «интегральной дозы» за это время – ID(TFD) (Дж).

### 8a) Dose in area N YZ: n1–n2

Если в ОД заданы области, то сюда помещается информация о дозе во всей области (во всех слоях), номер которой N указан. Номер можно изменить правой кнопкой "Area: N". YZ: n1–n2 – тип проекции, в которой заданы области и номера слоев, где они находятся (YZ – слои по X; YX – по Z).

$\langle D \rangle$  (Gy/pr) – средняя величина дозы в пределах всей области с нормировкой на 1 частицу/распад;

ID (J/pr) – «интегральная доза» (поглощенная энергия) во всей области (Дж/част);

Если задана ФД и рассчитывается TFD (см. 3), то оценивается величина средней дозы во всей области за время  $t = \text{TFD}$ .  $\langle \text{DTFD} \rangle$  (Гр) и величина «интегральной дозы» за это время – ID (TFD) (Дж).

### 8b) layer area

Здесь находится информация о дозе в одном слое области с номером N (область может занимать несколько слоев), если он выводится на рисунке.

$\langle DI \rangle$  (Gy/pr) – средняя величина дозы в пределах 1 слоя области с нормировкой на 1 частицу/распад;

IDI (J/pr) – «интегральная доза» во всей области (Дж/част).

Если задана ФД и рассчитывается TFD (см. 3), то оценивается величина средней дозы в 1-м слое области за время  $t = \text{TFD}$ .  $DI(\text{TFD})$  (Гр) и величина «интегральной дозы» за это время – IDI (TFD) (Дж).

Если статическое облучение ведется с нескольких направлений, то вверху экрана выводится следующая информация:

- Degrees: – направление облучения (град.);
- Probab.: – вероятность облучения с данного направления (доля испущенных частиц, определяется входными данными);
- FDpart(%): – вклад данного направления в очаговую дозу.

Пучок с направлением 0 гр. направлен вдоль оси Z.

***Информацию о файлах источников смотрите в файле помощи в меню PHANTOM → Sources***

## **3.8. Режим ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (BREMSSTRAHLUNG)**

*(На основе программ EPHSA43, EPHSA44 [1-4])*

### **3.8.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются**

Рассчитываются следующие ИНТЕГРАЛЬНЫЕ характеристики:

- поглощенная энергия в каждой зоне барьера;
- $Tn(z)$  – число частиц,  $E(z)$  – их энергия за барьером в зависимости от его толщины (для всех частиц);
- $\langle E \rangle$  – средняя энергия частиц за барьером;
- $An(z)$ ,  $Ae(z)$  – соответственно зависимость токового числового и энергетического альбедо (квазиальбедо) от толщины барьера для всех частиц;
- $E_{ref}$  – энергия отраженных от барьера частиц (для всех частиц);
- $\langle E \rangle$  – средняя энергия частиц, отраженных от барьера;
- $dE/dz$  – распределение поглощенной энергии по толщине барьера;

Рассчитываются следующие ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ характеристики:

- $N(E, \vartheta, \varphi)$  – спектрально-угловые распределения ТИ в переднюю (ВПЕРЕД) и заднюю (НАЗАД) полусферу в определенных направлениях, заданных полярными ( $\vartheta$ ) и азимутальными ( $\varphi$ ) углами;
- $N(\vartheta, \varphi)$  – угловое распределение числа фотонов,  $E(\vartheta, \varphi)$  – их энергии  $\langle E \rangle(\vartheta, \varphi)$  – средней энергии фотонов за барьерами заданной толщины и для отраженных от барьера фотонов;
- $N(E, 0-tet)$  – интегральные по углу спектры фотонов, вылетающих из барьера ВПЕРЕД и НАЗАД;
- число фотонов и их энергия, выходящие из барьера ВПЕРЕД и НАЗАД в конусе с углом раствора  $\vartheta$ ;
- $N_i(E_{min}-E, \vartheta, \varphi)$  – интегральные по энергии спектры фотонов ВПЕРЕД и НАЗАД;
- $dD/dt$  [мкГр\*м<sup>2</sup>/ч\*мА] – угловое распределение мощности поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от источника для тока пучка 1 мА. Для различных толщин барьера ВПЕРЕД и НАЗАД;
- $D$  [мкГр\*м<sup>2</sup>/част(распад)] – угловое и энергетическое (для каждого интервала спектра) распределение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от источника на 1 частицу (распад). Для различных толщин барьера ВПЕРЕД и НАЗАД;
- $D$  [мкГр\*м<sup>2</sup>/част(распад)] – угловое распределение поглощенной дозы в воздухе (для всего спектра) на расстоянии 1 м от источника на 1 частицу (распад).

### 3.8.2. Порядок работы в режиме BREMSSTRAHLUNG

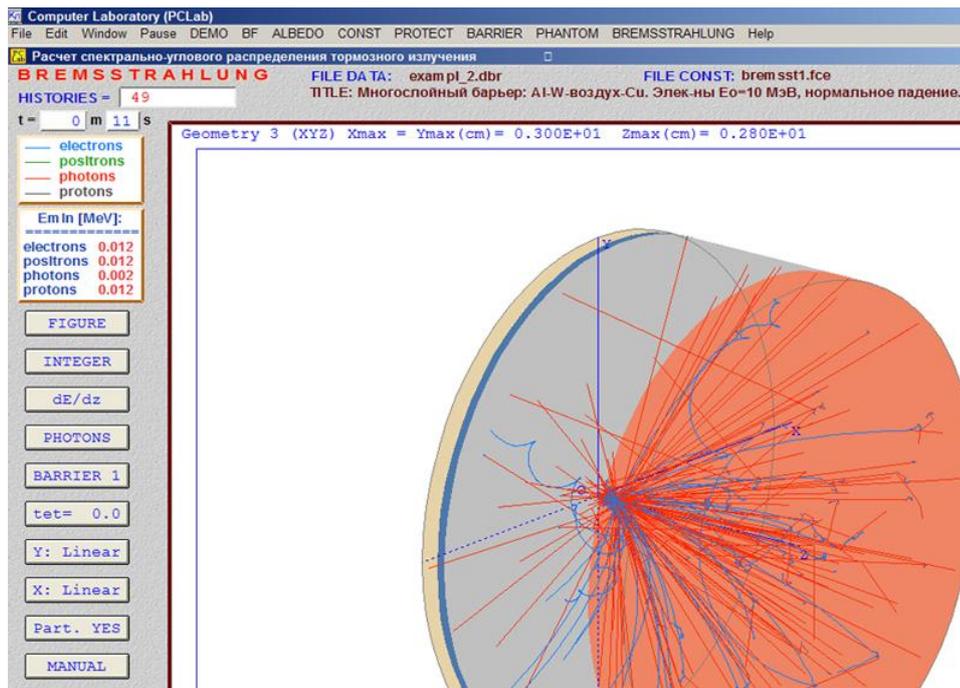
1) Работа начинается через меню: BREMSSTRAHLUNG → Start BREMSSTRAHLUNG. Правильная остановка моделирования: Stop BREMSSTRAHLUNG. ОСТАНОВКА РАБОТЫ на некоторое время: Pause → Pause, ПРОДОЛЖЕНИЕ РАБОТЫ: Pause → Resume.

2) В этом режиме необходимые для расчета данные вводятся из файла данных. Оформление таких файлов см. в меню "Data". Файл с данными для расчета должен находиться в папке ... \PCLAB \BREMSSTRAHLUNG.

3) После выбора файла данных и ввода начальных данных программа предложит уточнить минимальные энергии, до которых будут моделироваться траектории частиц. В двух небольших окнах слева отображаются цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории (см. рис. 3.8.1).

4) Затем программа предложит выбрать одну из 4-х геометрий, в которой будет изображен барьер (в большом окне см. снимок экрана). В это окно выводятся траектории частиц и результаты расчета в графическом виде. Рисовать или нет траектории, решайте через кнопку Part: YES(NO).

***ВНИМАНИЕ! Расчет с выводом траекторий частиц на экран требует гораздо большего времени.***



**Рис. 3.8.1.** Снимок части экрана в режиме BREMSSTRAHLUNG

5) Перед началом моделирования можно изменить начальную точку ДСЧ. Задайте изменение, если это необходимо.

б) Кнопки слева (см. рис. 3.8.1) позволяют управлять информацией в большом окне при выводе в него результатов моделирования. Работают, если на 1-й кнопке включено «DATA».

**1-я** выводит рисунок барьера и траектории частиц (FIGURE) или результаты в графическом виде (DATA);

**2-я** устанавливает общий тип отображаемых результатов интегральные (INTEGER), дифференциальные (DIFFERENTIAL);

**3-я** меняет тип выводимых на экран результатов:

а) ИНТЕГРАЛЬНЫЕ – последовательно меняет тип данных;

б) ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ – меняет тип спектров Spectra forw – ВПЕРЕД; Spectra back – НАЗАД;

**4-я** меняет тип частиц, характеристики поля излучения которых выводятся на экран. РАБОТАЕТ ТОЛЬКО ПРИ ВЫВОДЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ;

**5-я** меняет номер барьера, для которого выводятся спектры фотонов. РАБОТАЕТ ТОЛЬКО ПРИ ВЫВОДЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ;

**6-я** меняет направление, в котором рассчитан спектр фотонов. РАБОТАЕТ ТОЛЬКО ПРИ ВЫВОДЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ;

**7-я** изменяет тип шкалы оси OY: линейная (Linear) или логарифмическая (Log(base 10));

**8-я** изменяет тип шкалы оси OX: линейная (Linear) или логарифмическая (Log(base 10)).

**10-я** позволяет включить режим AUTO, при котором результаты расчета,

которые выводятся на экран, перерисовываются после расчета определенного количества историй, или это надо делать самостоятельно (MANUAL); **9-я** "Part. YES/NO" включает или отключает вывод траекторий частиц на экран в режиме FIGURE.

На всех результатах указывается статистическая погрешность расчета, если она превышает 1%. На экран выводится среднее значение и  $\pm$  средне-квадратическое отклонение.

Аналоговое вычисление дважды дифференциальных характеристик тормозного излучения требует очень больших затрат времени даже на современных компьютерах. Для уменьшения статистической погрешности результатов и времени моделирования в режиме BREMSSTRAHLUNG используются несколько методов неаналогового моделирования и неаналоговой оценки вкладов на построенных траекториях:

- 1) вычисление спектрально-углового распределения вылетающих из барьера фотонов на построенных траекториях частиц проводится с использованием локальной оценки по углу вылета фотона из барьера;
- 2) при моделировании процесса генерации тормозного излучения (ТИ) используется один из вариантов метода аналитического осреднения. Фотоны ТИ испускаются при каждом катастрофическом столкновении электрона (позитрона) с соответствующим весом;
- 3) используется метод расщепления: число фотонов ТИ, которые испускаются при каждом катастрофическом столкновении, равно числу интервалов гистограммы спектра, в которые возможен вклад от ТИ;
- 4) используется метод аналитического осреднения фотоэффекта;
- 5) используется метод расщепления траекторий фотонов. Подробнее см. [2, 3].

**ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ НЕАНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЗВОЛЯЮТ УМЕНЬШИТЬ ВРЕМЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДО НЕСКОЛЬКИХ ПОРЯДКОВ.**

См.: пример 3, где рассчитываются спектрально-угловые распределения ТИ из 10см слоя воздуха, через который проходят электроны с  $E = 1$  МэВ; пример 4, в котором рассчитываются спектрально-угловые распределения ТИ из 5 мм слоя меди, через которую проходят протоны с  $E = 100$  МэВ.

=====

Литература, где можно познакомиться с методами моделирования траекторий частиц (в том числе и с неаналоговыми): И.М. Соболев **Метод Монте-Карло**. Популярная лекция по математике, М.: Наука, 1985; И.М. Соболев **Численные методы Монте-Карло**. – М.: Наука, 1973; А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин **Введение в теорию прохождения частиц через вещество**. – М.: Атомиздат, 1978; А.М. Кольчужкин, А.В. Богданов **Метод Монте-Карло в теории переноса излучений**: Учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2006; М.П. Панин **Моделирование переноса излучения**: Учебное пособие – М.: МИФИ, 2008.

---

При работе режима BREMSSTRAHLUNG создаются следующие txt-файлы:

а) `bremss_res.txt`. В этот файл помещается информация о начальном этапе работы программы.

б) файл с именем, как у файла данных, но с расширением `.rbr`. Например, `exampl_1.dbr` → `exampl_1.rbr`. В этот файл помещаются вводимые данные и в конце результаты расчета. В нем также находится информация о этапах работы программы и ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть при вводе данных и во время моделирования.

в) `res_prom.rbr` – файл промежуточных результатов. Создается и переписывается периодически после моделирования числа историй= `NIST_PR`.

Все файлы находятся в папке...\`PCLAB\BREMSSTRAHLUNG`. Результаты можно смотреть в любом `txt`-редакторе.

Новый расчет начинайте после закрытия окна предыдущего расчета. Это необходимо, чтобы сбросить все переменные в начальное состояние.

Результаты тестовых расчетов смотрите в папке `DOC` в файле: `PCLAB_tests`.

### 3.8.3. Структура файлов данных в режиме BREMSSTRAHLUNG

Режим `BREMSSTRAHLUNG` вводит необходимые для расчета данные из файла данных, который должен иметь расширение `.dbr` и длину не более 20 символов. Рассмотрим порядок составления этих файлов. Несколько файлов данных с именами `exampl_*.dbr`, а также файлы констант: `bremsst1.fce`, `bremsst2.fce` и `bremsst3.fce` находятся в папке ...\`PCLAB\BREMSSTRAHLUNG`. Копии файлов данных находятся в папке ...\`PCLAB\BREMSSTRAHLUNG\EXAMPLES`.

#### ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ФАЙЛОВ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим в качестве примера структуру файла **`exampl_2.dbr`**

**ЗАДАЧА:** Расчет характеристик тормозного излучения для многослойного барьера. В воздушном слое имеется электрическое и магнитное поле.

входные данные `exampl_2.dbr`

`bremsst1.fce`

TITLE: Многослойный барьер: Al-W-воздух-Cu. Элек-ны  $E_0=10$  МэВ, нормальное падение.

4	!LZ
.2,.1,2,.1.	!dZ
3.	!dR
1,1,0,1	!NPRZ()
4	!NSMAX
1,4,5,2	!NBZ
0,..02,..04,..06,..08,..1,..12,..14,..16,..18,..2,..21,..22,..23,..24,..25,..26, ..27,..28,..29,..3,..5,1,..1.5,2,..2.3,2.4,2.5,2.6,2.7,2.8,2.9,3,..3.1, 3.2,3.3/	!ZRI()
3	!NPR
5	!NZB
.2,0.3,2.3,2.8,3.3	!ZPSB()
19	!NTB

0.,5.,10.,15.,20.,25.,30.,35.,40.,45.,50.,55.,60.,65.,70.,75.,80.,	
85.,89.	!TB()
19*0.	!FIB()
3	!NZN
.2.,3,3.3	!ZPSN()
10	!NTN
0.,10.,20.,30.,40.,50.,60.,70.,80.,89.	!TN()
10*135.	!FIN()
0,0.01,0.025	!NFE,Emin,dE
0.,.01,.015,.02,.03,.04,.05,.0588,.0589,.063,.0675,.0676,.069525,	
.08,.1,.15,2,3,4,.51,.52,.6,8,1,1.5,2,3,4,5,6,7,8,9.,	
9.5,10./	!FE()
1	!N_FTR
1	!NB_FTR()
0.2	!DZ_FTR()
1	!PR_FIELD (поле есть)
3	!NZ
1,0.0,0.0,-0.03	!NCP,Ex,Ey,Ez (МВ/см)
3	!NZ
2,0.5,-0.5,0.0	!NCP,Bx,By,Ez (Тл)
0	!NZ=0 (End)
9999999	!NISTM
20000	!NIST_PR
1000	!NTR
0	!ITZAD
16,19,17,20,7	!NCFIG
1	!NEPG
1,0	!NIEK,NKMTD
1,0	!NIEL,NLMTD
0,0	!NIEK_PR,NKMTD_PR
0,0	!NIEL_PR,NLMTD_PR
0	!NFOT
1,1,0.25,2.3	!MDG,NMDG,EMDG,ZRM_G
0	!NANNIH
1.d-25	!QGR
1	!NPOZ
0	!NPROT
ist	!nameist

---

описание exampl\_2.dbr

---

1) [bremsst1.fce] – имя файла, рассчитанного программой CONST, с расширением "fce" (см. Help CONST).

2) [TITLE:...] – краткое описание файла (до 100 символов).

3) [4 !LZ] LZ – число слоев (зон) по Z (max= 100), на которые разбит поглотитель (барьер). Здесь это 4 зоны по Z.

Поглотитель имеет вид цилиндра, поделенного на зоны по Z, состоящие из одного вещества. Число зон по R = 1. Барьер может быть неоднородным только по Z. Номера зон увеличиваются последовательно слева направо.

- 4) [.2.,.1,2.,.1. !dZ] – толщины всех зон по Z (см).
- 5) [3. !dR] – величина радиуса поглотителя по R (см).
- 6) [1,1,0,1 !NPRZ()] – признаки применения методов неаналогового моделирования ТИ в слоях по Z: 1 – ДА; 0 – НЕТ ( см. Help BREMSSTRAHLUNG ). Здесь 0 в слое воздуха.
- 7) [1,4,5,2 !NBZ] – номера веществ в каждой зоне.
- 8) [0.,.02,.04,.06,.../ !ZRI()] – значения границ (см) для рассчитываемых интегральных характеристик поля излучения (max 100) от 0 до Zmax. Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

Это условные границы по Z внутри поглотителя в любом месте. При их пересечении частицей вычисляются интегральные характеристики. Интегральные – это зависимости только от Z барьера, например, коэффициенты пропускания, распределение по Z поглощенной энергии.

- 9) [3 !NPR] – признак вычисления спектров. NPR = 1 рассчитываются только спектры фотонов, выходящих из барьера НАЗАД; NPR = 2 – только ВПЕРЕД; NPR = 3 и ВПЕРЕД, и НАЗАД.
- 10) [5 !NZB] – число границ барьеров, для которых вычисляются спектрально-угловые распределения ТИ ВПЕРЕД (max 9).

Это границы по Z внутри поглотителя (условные) в любом месте, за которыми вычисляются спектрально-угловые распределения ТИ ВПЕРЕД. Они рассчитываются в барьерной геометрии. Это означает, что вклады вычисляются только до первого пересечения частицей границы барьера в направлении вперед.

- 11) [.2,0.3,2.3,2.8,3.3 !ZPSB()] – значения этих границ (см) в интервале от 0 до Zmax барьера.

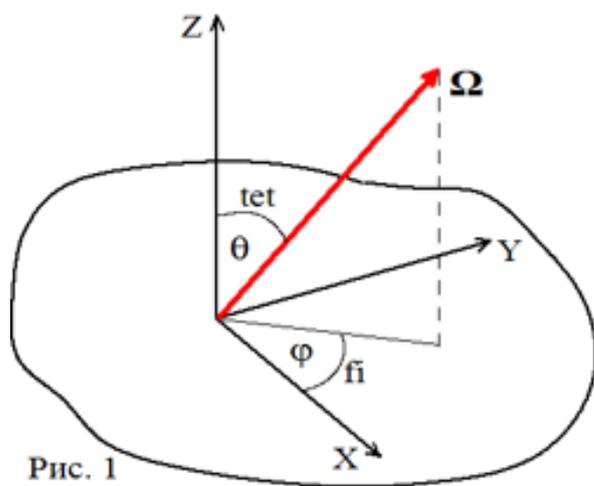


Рис. 3.8.2. К определению углов  $\theta$  и  $\phi$

- 12) [19 !NTB] – число значений полярного угла  $\theta$  для спектров ВПЕРЕД (max 20). См. рис. 3.8.2.

- 13) [0.,.5.,.10.,.15.,... !TB()] – значения полярных углов  $\theta$  (град) в интервале [0-90) град. Менее 90 град.! Задаются относительно положительного направления оси Z.

- 14) [19\*0. !FIB()] – значения азимутальных углов  $\phi$  для спектров ВПЕРЕД в интервале [0-360] град относительно оси X (см. рис. 3.8.2. Для каждого угла  $\theta$  может быть

свое значение  $\phi$ . Число значений  $\phi$  и  $\theta$  совпадают.

- 15) [3 !NZN] – число границ барьеров, для которых вычисляются спектрально-угловые распределения ТИ НАЗАД (max 9).

*Это границы по Z внутри поглотителя (условные) в любом месте, которые могут не совпадать с границами ВПЕРЕД. Спектры вычисляются в пределах толщины барьера от его начала до заданной границы.*

16) [2,3,2.8 !ZPSN()] – значения этих границ (см) в интервале от 0 до Zmax барьера.

17) [10 !NTN] – число значений полярного угла  $\theta$  для спектров НАЗАД (max 20).

18) [0.,10.,20.,... !TN()] – значения полярных углов  $\theta$  (град) в интервале [0-90] град. Менее 90град.! Задаются относительно отрицательного направления оси Z. 0 град соответствуют  $\theta = 180$  гр. на рис. 3.8.2.

19) [10\*135. !FIN()] – значения азимутальных углов  $\phi$  для спектров НАЗАД в интервале [0-360] град.

20) [0,0.01,0.025 !NFE,Emin,dE] NFE – число интервалов гистограммы спектров ТИ. Если NFE = 0, то значения энергий спектров вводятся вручную (см. (21)). Если NFE > 0 (max= 399), то значения энергетических границ задает программа, используя NFE, Emin(МэВ) – минимальная энергия спектра и dE (МэВ) – ширина интервала. Во втором случае ширина всех интервалов одинакова.

*Первое значение энергии в спектре всегда = 0. Наибольшее должно быть не менее максимальной кинетической энергии электронов. Для позитронов при аннигиляции на лету возможно появление аннигиляционных гамма-квантов с энергией больше кинетической энергии позитронов.*

21) [0.,.01,.015,.02,.../ !FE()] – значения границ (МэВ) энергетических интервалов гистограммы для спектров (max = 401). Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

*Это ручной ввод энергий спектра. Он должен присутствовать только, если NFE=0 (см. 20). Значения возрастают от 0 до Emax. Emax не менее максимальной энергии источника. Энергии задаются произвольно, нужно выделять необходимые области в спектре (например для энергий ХРИ с K и L оболочек). В области максимума спектра (где он быстро меняется) границы надо делать чаще. Следует проводить предварительный расчет и по его результатам уточнять границы.*

22) [1 !N\_FTR] – число слоев фильтра (max=5), 0 – нет фильтра.

*Часто спектры ТИ и рентгеновского излучения (РИ) подвергают фильтрации, пропуская излучение через тонкие плоские слои из различных веществ, которые поглощают мягкую часть спектра и изменяют его форму. Для РИ таким фильтром может являться и слой воздуха между рентгеновской трубкой и детектором (см. примеры 6, 7). Учитывается ослабление всех линий спектра в соответствии с коэффициентом ослабления. Для всех направлений излучение падает на фильтр перпендикулярно.*

23) [1 !NB\_FTR()] – номер вещества в каждом слое фильтра.

*Константы для этих веществ должны быть рассчитаны программой CONST.*

24) [0.2 !DZ\_FTR()] – толщина каждого слоя фильтра в см.

*Если фильтра нет, то нет и данных 23) и 24).*

25) [1 !PR\_FIELD] – признак наличия внешнего электрического и магнитного поля: 0 – поля нет; 1 – поле есть.

25а) [3 !NZ] – номер зоны с полем.

25б) [1,0,0,0,0,-0.03 !NCP,Ex,Ey,Ez (МВ/см)] NCP – тип поля: 1 – электрическое; 2 – магнитное. Ex, Ey, Ez – проекции вектора электрического поля (МВ/см). Задано ускоряющее электрическое поле в воздухе 30 кВ/см.

25в) [3 !NZ] – номер зоны с полем (в зоне могут быть оба типа поля).

25г) [2,0.5,-0.5,0.0 !NCP,Bx,By,Ez (Тл)] Bx, By, Ez – проекции вектора магнитного поля (Тесла).

25д) [0 !NZ=0 (End)] – так заканчивается ввод данных поля.

*Если поле в зоне отсутствует, то данные 23а)...23д) не вводятся.*

26) [9999999 !NISTM] – максимальное число историй (любое число).

27) [20000 !NIST\_PR] – число историй, после моделирования которых происходят периодические промежуточные выдачи результатов расчета в специальный файл (res\_prom.rbr).

28) [1000 !NTR] – число историй, при расчете которых траектории частиц строятся на экране.

29) [0 !ITZAD] – время задержки (мсек) перед построением очередного элемента траектории частиц. 0 – нет задержки.

*ВНИМАНИЕ! Моделирование с построением траекторий частиц на экране (особенно с использованием задержки) выполняется намного медленнее, чем без построения.*

30) [16,19,17,20,7 !NCFIG] – номера цвета веществ, которыми они отображаются на экране. Их количество должно быть не менее числа веществ, для которых рассчитан файл констант с расширением "fsc" программой CONST (см. пункт 1). Цвета и их номера можно увидеть через раздел меню "Palette".

31) [1 !NEPG] – признак поглощения фотонов при  $E < E_{min}$  (0–нет, 1–да). Если 1, то оставшаяся энергия фотона добавляется к поглощенной энергии.

32) [1,0 !NIEK,NKMTD] – признак (NIEK) и метод (NKMTD) ионизации К-оболочки электронами (позитронами). NIEK = 0–нет, 1–да. NKMTD=0 – аналоговый метод, 1 – аналитическое усреднение (НЕАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ).

33) [1,0 !NIEL,NLMTD] – то же для L-оболочки электронами (позитронами).

34) [0,0 !NIEK\_PR,NKMTD\_PR] – аналогично (32), но для протонов.

35) [0,0 !NIEL\_PR,NLMTD\_PR] – аналогично (33), но для протонов.

36) [0 !NFOT] – признак аналитического усреднения фотоэффекта (поглощения фотона): 0– нет, 1– только для фотонов летящих вперед, 2– только назад, 3– для всех. Позволяет увеличить глубину проникновения фотонов для веществ, у которых велико сечение фотопоглощения.

37) [1,1,0.25,2.3 !MDG,NMDG,EMDG,ZRM\_G] – MDG – количество фотонов при ветвлении (расщеплении) их траектории.  $MDG \geq 0$ . Если  $MDG = 0$ , то нет расщепления;  $MDG > 0$  – это НЕАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ. Увеличение MDG увеличивает время счета. NMDG – признак расщепления фотонов: 1 – только которые движутся вперед, 2 – только назад, 3 – все. EDMG – ми-

нимальная энергия (МэВ), до которой проводится расщепление (при  $E < E_{MDG}$  расщепления нет).  $ZRM\_G$  – граница ветвления по  $Z$  (см), ветвление происходит в области  $Z \geq ZRM\_G$  (применять для необходимости глубокого проникновения).

*Если фотон появился в результате расщепления (или его траектория расщеплялась), то больше в расщеплении он не участвует.*

38) [n !NANNIH] – признак учета аннигиляции на лету:  $n=0$  -аналоговое моделирование аннигиляции на лету;  $n=1$  – неаналоговое моделирование (аннигиляция происходит в каждой точке столкновения позитрона с соответствующим весом);  $n=2$  -отключение аннигиляции на лету.

39) [1.0d-25 !QGR] – минимальный вес частиц, до которого строятся их траектории.  $0 < QGR < 1$ . Заканчиваться траектория частицы может как по достижении минимальной энергии или вылета из барьера, так и по достижении минимального веса = QGR.

40) [1 !NPOZ] – признак вычисления интегральных характеристик позитронов 1 – ДА, 0 – НЕТ.

41) [0 !NPROT] – признак вычисления интегральных характеристик протонов 1 – ДА, 0 – НЕТ.

42) [ist!nameist] Начало ввода характеристик источника. Структуру этих данных см. в меню "Sources".

Результаты тестовых расчетов см. в папке DOC в файле: PCLAB\_tests

---

---

#### **Файл exampl\_1.dbr**

ЗАДАЧА: Электроны с энергией 6 МэВ падают на слой воды. Одновременно рассчитываются спектральноугловые распределения тормозного излучения (ТИ), рождающегося в воде для нескольких толщин барьера и для нескольких направлений вылета "вперед" и "назад".

#### **Файл exampl\_3.dbr**

ЗАДАЧА: Расчет спектральноугловых распределений ТИ из слоя воздуха для электронов с энергией 1 МэВ. Демонстрируются возможности неаналоговых методов, которые используются в программе для вычисления характеристик ТИ.

#### **Файл exampl\_4.dbr**

ЗАДАЧА: Расчет спектральноугловых распределений ТИ из слоя меди, на который падает пучок протонов с энергией 100 МэВ. ТИ рождается от вторичных электронов. Демонстрируются возможности неаналоговых методов, которые используются в программе для вычисления характеристик ТИ.

#### **Файл exampl\_5.dbr**

ЗАДАЧА: Расчет спектральноугловых распределений рентгеновского излучения для напряжения рентгеновской трубки  $U_{max}=105$  кВ. Анод из W.

#### **Файл exampl\_6.dbr**

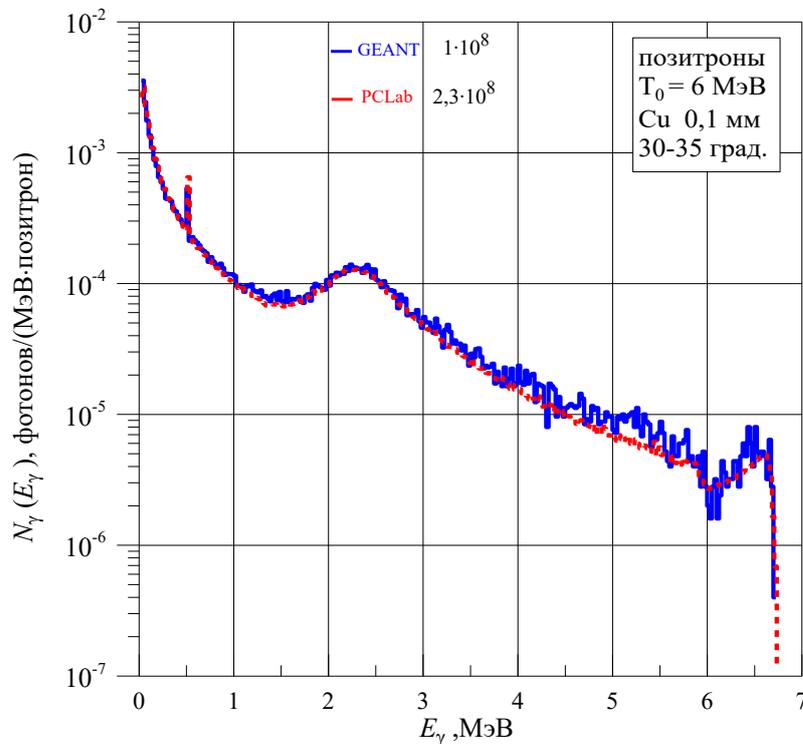
ЗАДАЧА: Расчет спектральноугловых распределений рентгеновского излучения для  $U_{max}=100$  кВ. Анод из W. Рентгеновское излучение проходит через двухслойный фильтр  $Be+Al$  и слой воздуха 75 см.

#### **Файл exampl\_7.dbr**

ЗАДАЧА: Расчет спектральноугловых распределений рентгеновского излучения для  $U_{max}=40$  кВ. Анод из W. Рентгеновское излучение проходит через фильтр из Al и слой воздуха 100 см.

### Файл exampl\_8.dbr

ЗАДАЧА: Расчет спектров ТИ и аннигиляционного излучения. На однородный барьер из Cu падает нормально узкий пучок позитронов с кинетической энергией 6 МэВ. Рассчитываются спектры тормозного и аннигиляционного излучения, выходящие из барьера под различными углами. Значения границ интервалов спектра задаются программой через число интервалов и их ширину. Неаналоговое моделирование аннигиляции на лету. (См. рис. 3.8.3).



**Рис. 3.8.3.** Спектр тормозного и аннигиляционного излучения, выходящего из медного барьера толщиной 0,1 мм в телесном угле с интервалом полярного угла от 30 до 35 град. Сравнение с расчетами по программе GEANT4

### Файл exampl\_9.dbr

ЗАДАЧА: На барьер Cu(0,2мм)+air(100мм) падает нормально узкий пучок позитронов с кинетической энергией 6 МэВ. Диаметр барьера 16мм. Рассчитываются спектры тормозного и аннигиляционного излучения, выходящие из меди и воздуха под различными углами. Значения границ интервалов спектра задаются программой через число интервалов и их ширину. Неаналоговое моделирование аннигиляции на лету.

*Режим BREMSSTRAHLUNG позволяет работать с теми же типами источников, что и режим BARRIER, поэтому характеристики источников и порядок ввода данных для них смотрите в разделе 3.6.4.*

#### Список литературы

1. Беспалов В.И. **Лекции по радиационной защите**: учебное пособие. 5-е изд., расшир. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 695 с.
2. Беспалов В.И. **Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц** // Изв. вузов Физика, Приложение. – 2000. – № 4. – С. 159–165.

3. Беспалов В.И. **Характеристики поля тормозного излучения за плоски ми мишенями, облучаемыми электронами.** 1980. Деп. в ВИНТИ, № 1782-80деп.
4. Беспалов В.И. **Расчет характеристик рентгеновского излучения методом Монте-Карло.** 1980. Деп. в ВИНТИ, № 1669-80деп.

### **3.9. Режим ПОТОК (FLUX)**

*(На основе программы EPHSA5 [1])*

#### **3.9.1. Характеристики излучения, которые рассчитываются**

Рассчитываются следующие ИНТЕГРАЛЬНЫЕ характеристики:

- поглощенная энергия и поглощенная доза в каждой зоне поглотителя;
- $N_f(z)$  – число частиц (электронов, позитронов, фотонов, протонов), движущихся вперед, в зависимости от толщины поглотителя;
- $E_f(z)$  – энергия этих частиц;
- $\langle E_f \rangle(z)$  – их средняя энергия;
- $N_b(z)$  – число частиц (электронов, позитронов, фотонов, протонов), движущихся назад, в зависимости от толщины поглотителя;
- $E_b(z)$  – энергия этих частиц;
- $\langle E_b \rangle(z)$  – их средняя энергия;
- $dE/dz$  – распределение поглощенной энергии по толщине поглотителя;
- $\Phi(z)$  – распределение флюенса частиц (электронов, позитронов, фотонов, протонов) по толщине поглотителя;
- Stop el – распределение по толщине поглотителя остановившихся электронов (Stop pr – протонов) с энергиями менее  $E_{min}$ ;
- $ID(0-z)$  – интегральная доза в поглотителе от 0 до  $z$  (Дж);
- $J_z$  – проекция электрического тока на ось OZ в зависимости от толщины поглотителя (от всех заряженных частиц);
- $q(z)$  – распределение поглощенного заряда по толщине поглотителя (от всех заряженных частиц);
- $D_p(z)$  – распределение поглощенной дозы по толщине поглотителя от всех частиц. Средняя в слое с заданным R вычисления данных. Нормировка на 1 частицу источника. Рассчитывается только для веществ, находящихся в 1-й по R зоне;
- $dD/dt(z)$  – распределение мощности дозы по толщине поглотителя от всех частиц для радионуклидного источника. Нормировка на 1 Бк. Средняя в слое с заданным R вычисления данных. Рассчитывается только для веществ, находящихся в 1-й по R зоне.

Для всех частиц рассчитываются следующие ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ характеристики:

- $\Phi(E, z)$  – энергетическое распределение флюенса на заданной глубине (в слое заданной толщины  $dz$ );
- $INT\_Ф$  – интегральное по энергии распределение флюенса на заданной глубине  $INT\_Ф(E, z) = \int_{E_{min}}^E \Phi(E', z) dE' \quad (1/см^2)$  – флюенс частиц с

энергиями от  $E_{min}$  до  $E$  средний в заданном поперечном сечении поглотителя от  $r=0$  до  $r=R_{max}$ ;

- $N(\vartheta, z)$  – угловое распределение флюенса на заданной глубине;
- $INT\_Ф$  – интегральное по углу распределение флюенса на заданной гл

бине  $INT\_Ф(\vartheta, z) = 2\pi \int_0^{\vartheta} \Phi(\vartheta', z) \sin \vartheta' d\vartheta' \quad (1/\text{см}^2)$  – флюенс частиц с

направлениями от  $\vartheta=0^\circ$  до  $\vartheta$  средний в заданном поперечном сечении поглотителя от  $r=0$  до  $r=R_{max}$ ;

- $\Phi(r, z)$  – радиальное распределение флюенса на заданной глубине;
- $INT\_Ф$  – интегральное по радиусу распределение флюенса на заданной

глубине  $INT\_Ф(R, z) = 2\pi \int_0^R \Phi(r, z) r dr \times dz \quad (\text{см})$  – полный путь всех части

данного типа в слое толщиной  $dz$  и с поперечным рамером от  $r=0$  до  $r=R$ ;

- $E_{abs}(r, z)$  радиальное распределение поглощенной энергии на заданной глубине (в слое заданной толщины  $dz$ );
- $INT\_E_{abs}$  интегральное по радиусу распределение поглощенной энергии

на заданной глубине  $INT\_E_{abs}(R, z) = 2\pi \int_0^R E_{abs}(r, z) r dr \times dz \quad (\text{МэВ})$  –

средняя поглощенная энергия в слое толщиной  $dz$  и с поперечным рамером от  $r=0$  до  $r=R$ .

Если  $dz =$  толщине всего поглотителя, то ДИФФ. характеристики излучения вычисляются во всем объеме поглотителя.

- возможен расчет функции отклика детектора (Detector Response Function (DRF)) для детекторов NaI(Tl) и Ge.

На всех результатах отображается статистическая погрешность расчета, если она превышает 1%. На экран выводится среднее значение  $\pm$  среднее квадратическое отклонение.

### 3.9.2. Порядок работы в режиме FLUX

1) Работа начинается через меню: FLUX  $\Rightarrow$  Start FLUX. Правильное окончание моделирования: Stop FLUX. ОСТАНОВКА РАБОТЫ на некоторое время: Pause  $\Rightarrow$  Pause, ПРОДОЛЖЕНИЕ РАБОТЫ: Pause  $\Rightarrow$  Resume.

2) Необходимые для расчета данные вводятся из файла данных. Содержание таких файлов см. в меню «Data». Файл с данными для расчета должен находиться в папке ... \PCLAB \FLUX.

3) Программа предложит выбрать одну из 4-х геометрий, в которой будет изображен поглотитель (в большом окне). В это окно выводятся траектории частиц и результаты расчета в графическом виде. Рисовать или нет траектории решайте через кнопку «Part. YES/NO».

*Расчет с выводом траекторий частиц на экран требует гораздо большего времени.*

4) В двух маленьких окнах слева отображаются цвета частиц и минимальные энергии, до которых строятся их траектории.

18 кнопок позволяют управлять информацией в большом окне при выводе результатов расчета в графическом виде. Работают, если на 1-й кнопке включено «DATA».

**1-я** выводит рисунок барьера и траектории частиц (FIGURE) или результаты в графическом виде (DATA);

**2-я** устанавливает общий тип отображаемых результатов интегральные (INTEGER), дифференциальные (DIFFERENTIAL);

**3-я** меняет тип выводимых интегральных или дифференциальных результатов. НЕ ВСЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, КОТОРЫЕ ВЫЧИСЛЯЮТСЯ, ВЫВОДЯТСЯ В ГРАФИЧЕСКОМ ВИДЕ;

**4-я** меняет тип частиц, характеристики поля излучения которых выводятся на экран;

**5-я** меняет номер слоя, для которого выводятся дифференциальные характеристики частиц;

**6-я** позволяет включить режим AUTO, при котором результаты на экране перерисовываются после расчета определенного количества историй, или это надо делать самостоятельно (MANUAL);

**7-я** изменяет тип шкалы оси OY: линейная (Linear) или логарифмическая (Log(base 10));

**8-я** изменяет тип шкалы оси OX: линейная (Linear) или логарифмическая (Log(base 10)).

-----  
**9-я** «Part. YES/NO» включает или отключает вывод траекторий частиц на экран в режиме FIGURE;

**10-я** «GEOM: ??» позволяет изменить тип геометрии, в которой рисуется поглотитель и траектории частиц.

-----  
Кнопки 11–16 позволяют управлять выводом результатов на экран при рас чете DRF.

**11-я** (Res. func) выводит на экран распределение импульсов поглощенной энергии (реальное распределение). Предварительно надо войти в режим вывода результатов расчета (DATA);

**12-я** ( $N_c+1$ ) увеличивает на 1 номер канала с информацией о энергии канала и вкладе в канал;

**13-я** ( $N_c-1$ ) уменьшает на 1 номер канала с информацией;

**14-я** (Lines/Points) меняет вид графической информации о величине вклада в канале: линии или точки;

**15-я** (Error) включает или выключает выдачу статистической погрешности расчета;

**16-я** (RF\_DET  $\rightarrow$ ) включает или выключает выдачу на экран функции отклика детектора.

**17-я** (K\_COMP) позволяет в диалоговом режиме изменить значение коэффициента увеличения высоты комптоновского распределения. Работает

только при линейном масштабе по оси Y. Чтобы понять, надо попробовать.

При выводе информации о функции отклика можно использовать кнопки 7–8.

-----  
**18-я** (Image) позволяет записать в файл(bmp) изображение с графического окна. Работает всегда.

*При расчете и выводе DRF на экран внизу выводится информация о канале: энергия, величина вклада. Номер канала можно изменить кнопками 12, 13, а также нажав левую кнопку мыши на графическом экране.*

*Кроме этого выводится информация об эффективности детектора, которая равна отношению числа зарегистрированных вкладов (частиц) к числу частиц, испущенных источником. Если все частицы падают на детектор, то к числу частиц, упавших на детектор (необходимо задавать такую геометрию источника).*

*Рассчитывается и выводится эффективность детектора по фотонику, которая равна отношению числа зарегистрированных вкладов (частиц) в заданном канале (или 2-х каналах Co-60) к числу частиц, испущенных источником. Необходимо задать значения 1-й или 2-х энергий фотофиксов.*

При работе в режиме FLUX создаются следующие txt-файлы:

а) flux\_res.txt. В этот файл помещается информация о начальном этапе работы программы.

б) файл с именем, как у файла данных, но с расширением .re5. Например, exampl\_2.de5  $\Rightarrow$  exampl\_2.re5. В этот файл помещаются вводимые данные и результаты в конце расчета. В нем также находится информация о этапах работы программы и ПРИЧИНАХ ОШИБОК, которые могут возникнуть при вводе данных и во время моделирования.

в) при расчете функции отклика детектора создается файл с именем, как у файла данных, но с дополнением и расширением (...\_rf.dat). В этот файл заносятся данные: RF\_C – распределение поглощенной энергии в детекторе по каналам, RF\_C – DRF и интегралы от них.

г) res\_prom.re5 – файл промежуточных результатов. Создается и переписывается периодически после моделирования некоторого числа историй (NIST\_PR).

Все файлы находятся в папке...PCLAB\FLUX. Результаты можно смотреть в любом txt-редакторе.

Новый расчет начинайте после закрытия окна предыдущего расчета. Это необходимо, чтобы сбросить все переменные в начальное состояние.

### **3.9.3. Структура файлов данных в режиме FLUX**

Режим FLUX вводит необходимые для расчета данные из файла данных, который должен иметь расширение .de5 и длину не более 20 символов. Рассмотрим порядок составления этих файлов. Несколько файлов данных с именами exampl\*.de5, а также файлы констант: exampl\_6.fce и dat10000.fce находятся в папке ...PCLAB\FLUX. Копии файлов данных находятся в папке ...PCLAB\FLUX\EXAMPLES.

Порядок ввода данных для режима FLUX во многом совпадает с режимом BARRIER.

## ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ФАЙЛОВ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим в качестве примера структуру файла exampl\_1.de5

ЗАДАЧА: расчет потоковых интегральных и дифференциальных характеристик поля излучения в воде от источника электронов с энергией 6 МэВ.

входные данные exampl\_1.de5

\*\*\*\*\* часть 1 (ГЕОМЕТРИЯ)

exampl\_6.fce

TITLE: Однородный поглотитель из воды. Точечный ист-к элек-ны E<sub>0</sub>=6 МэВ, нормальное падение.

1,1 ! LZ,LR  
4. ! d\_Z  
3. ! d\_R  
1 ! NBZ  
0 ! NBZ\_NO

\*\*\*\*\* часть 2 (ДАнные ДЛя ФУНКЦИОНАЛОВ)

0.,0.05.,1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8.,9,1.,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,  
1.9,2.,2.1,2.2,2.3,2.4,2.5,2.6,2.7,2.8,2.9,3.,3.1,3.2,3.3,3.4,3.5,  
3.6,3.7,3.8,3.9,4./ ! ZRI()  
6 ! NZRD  
0.,1.,1.1,3.,3.1,4. ! ZRD  
0,1,0,1,0 ! NPSLOI  
1 ! NALB  
0,0.01,0.025 !NFE,Emin,dE  
0.,.005,.006,.008,.01,.015,.02,.025,.03,.04,.06,.08,.1,.125,.15,  
.2,.25,.3,4.,5.,6.,8,1.,1.25,1.5,1.75,2.,2.25,2.5,2.75,3.,3.25,  
3.5,3.75,4.,4.25,4.5,4.75,5.,5.25,5.5,5.75,6./ ! FE()  
0.,5.,10.,15.,20.,25.,30.,40.,50.,60.,70.,80.,90.,100.,110.,120.,  
130.,140.,150.,160.,170.,180./ ! FT()  
.0.,1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8,1.,1.5,2.,2.5,3./ ! FR()

0 ! NSTR

1 ! NPE

1 ! NPG

1 ! NPOZ

0 ! NPROT

\*\*\*\* часть 3 (ДАнные ДЛя ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТ. (DRF))

0 ! RF (0, 1)

\*\*\*\*\* часть 4 (ДАнные ДЛя ВНЕШНЕГО Е и В ПОЛя)

0 ! PR\_FIELD (Поля нет)

\*\*\*\*\* часть 5 (ИСТОРИИ)

9999999 ! NISTM

20000 ! NIST\_PR

1000 ! NTR

\*\*\*\*\* часть 6 (ЗАДЕРЖКА, ЦВЕТА ВЕЩЕСТВ)

0 ! ITZAD

3,7,6,19,0,14 ! NCFIG

\*\*\*\*\* часть 7 (СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ)

.75	! DSMPER
1	! NEPG
1,0	! NIEK,NKMTD
1,0	! NIEL,NLMTD
0,0	! NIEK_PR,NKMTD_PR
0,0	! NIEL_PR,NLMTD_PR
0,1,.5,.1	! MDE,NMDE,EMDE,ZRM_E
0,1,.2,.5	! MDG,NMDG,EMDG,ZRM_G
0	! NFOT
0,3,.5.	! NTORM,ETORM,WR_MAX
0	! NANNIH
1.d-25	! QGR
0	! NZON
0	! NZVR
0,1,0.5d0	! NOAN,IZ_NOAN,A_NOAN

\*\*\*\*\* часть 8 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)

ist ! nameist

\_\_\_\_\_ описание exampl\_1.de5 \_\_\_\_\_

\*\*\*\*\* часть 1 ГЕОМЕТРИЯ

Геометрии в режимах BARRIER и FLUX одинаковые.

1) [exampl\_6.fce] – имя файла, рассчитанного программой CONST, с расширением "fce" (см. Help CONST).

2) [TITLE:... ] – краткое описание файла (до 100 символов).

3) [1,1 !LZ,LR] LZ – число зон по Z (max 100), LR – по R (max 100), на которые разбит поглотитель. Здесь это 1 зона по Z и 1 по R.

*Поглотитель имеет вид цилиндра, поделенного на зоны по Z и по R, состоящие из одного вещества. Границы каждого вещества по R продолжаются через все зоны по Z, также как границы каждого вещества по Z продолжаются через все зоны по R. При этом возможно образование соприкасающихся зон из одного вещества. Номера зон увеличиваются после довательного слева направо и снизу вверх, начиная с зон, примыкающих к оси цилиндра. Схема построения сложной геометрии показана на рисунке в разделе меню "Geometry". Ввод данных для такой геометрии см. в меню для режима "BARRIER".*

4) [4. !dZ] – толщины всех зон по Z(см).

5) [3. !dR] – размеры всех зон по R(см).

6) [1 !NVZ] – номер веществ в зоне поглотителя.

*Номера веществ соответствуют их порядку расположения в файле exampl\_6.fce. В данном примере поглотитель однородный – одно вещество. Порядок ввода веществ для неоднородной геометрии см. описание в меню режима "BARRIER".*

7) [1 !NBZ\_NO] – номер вещества, которое не надо изображать на рисунке поглотителя в геометриях 3 и 4 (когда есть зоны и по Z и по R). В этом случае 3-х мерный рисунок выглядит более подробно. Указывайте номер вещества, в

котором находятся элементы конструкции поглотителя (например, воздух).  
Задайте 0, если хотите рисовать все вещества.

\*\*\*\*\* часть 2 (ДААННЫЕ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛОВ)

8) [0.,0.05,1.,2,.../ !ZRI()] – значения границ (см) для рассчитываемых интегральных характеристик поля излучения (мах 100) от 0 до  $Z_{\max}$ . Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

*Это условные границы по Z внутри поглотителя в любом месте. При их пересечении частицей вычисляются интегральные характеристики. Интегральные – это зависимости только от Z барьера, например, плотности потоков частиц, распределение по Z поглощенной энергии и др.*

9) [6 !NZRD] – число границ слоев для вычисления дифференциальных потоковых характеристик внутри этих слоев (мах 9 слоев), внутри которых вычисляются дифф. характеристики поля излучения. Эти слои могут чередоваться со слоями, внутри которых дифф. характеристики поля излучения не вычисляются. Всего мах 20 границ слоев. Первая граница – начало поглотителя (0), последняя граница – конец поглотителя по Z.

***Дифференциальные характеристики поля излучения – это характеристики, зависящие от энергии (спектр), направления (угловое распределение), радиуса (радиальное распределение).***

*Это границы по Z внутри поглотителя (условные) в любом месте. При их пересечении и прохождении частиц через выделенный слой вещества в нем вычисляются их потоковые угловое, энергетическое и радиальное распределения. Используется оценка по пробегу. Вклады вычисляются при любом попадании частицы в выделенный слой и при любом направлении движения (вперед и назад относительно оси Z от 0 до 180 град.).*

10) [0.,1.,1.1,3.,3.1,4. !ZRD] – значения этих границ (см) в любом месте в интервале от 0 до  $Z_{\max}$ . Для каждого выделенного слоя задаются 2 границы: левая и правая. При оценке по пробегу вклад в функционал вычисляется при каждом пересечении (попадании) частицы в заданный слой, даже, если частица не испытывает в слое взаимодействий. Поэтому нет необходимости делать слой толстым.

***ПОМНИТЕ, рассчитываемый функционал усредняется по толщине слоя и по его площади. Вычисляется дифференциальный флюенс частиц с нормировкой на одну частицу источника, или на 1 распад (для р/н источников).***

11) [0,1,0,1,0 !NPSLOI] – признаки вычислять (1) или не вычислять (0) дифф. характеристики излучения в слое. Выделено 2 слоя, где проводятся вычисления, в остальных 3-х нет. Весь поглотитель разбит на 5 слоев.

12) [1 !NALB] – признак вычисления дифф. характеристик альбедо. 0 – не вычисляются, 1 – вычисляются от всей толщины поглотителя.

*Следующие далее границы для спектров, угловых и радиальных распределений задаются, если NZRD > 0 или NALB > 0.*

13) [0,0.01,0.025 !NFE,Emin,dE] NFE – число интервалов гистограммы спектров ТИ. Если NFE=0, то значения энергий спектров вводятся вручную (см. (14)). Если NFE > 0 (мах = 399), то значения энергетических границ задает программа,

используя NFE, Emin(МэВ) – минимальная энергия спектра и dE (МэВ) – ширина интервала. Во втором случае ширина всех интервалов одинакова.

*Первое значение энергии в спектре всегда =0. Наибольшее должно быть не менее максимальной кинетической энергии электронов. Для позитронов при аннигиляции на лету возможно появление аннигиляционных гамма-квантов с энергией больше кинетической энергии позитронов.*

14) [0.,.005,.006,.008,.../ !FE()] – значения границ (МэВ) энергетических интервалов гистограммы для спектров (max=101). Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

*Это ручной ввод энергий спектра. Он должен присутствовать только, если NFE=0 (см. 13). Значения возрастают от 0 до Emax. Emax не менее энергии источника. Энергии задаются произвольно, нужно выделять необходимые области в спектре (например для энергий ХРИ с K и L оболочек). В области тах спектра (где он быстро меняется) границы надо делать чаще. Следует проводить предварительный расчет и по его результатам уточнять границы. Это относится ко всем дифференциальным характеристикам (угловому и радиальному распределениям).*

15) [0.,5.,10.,15.,.../ !FT()] – значения границ интервалов гистограммы угловых распределений в градусах (max=101). Начинаются с 0 и возрастают до угла не менее 180 гр. Значения произвольные, могут быть дробными. Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

16) [.0.,1.,2.,3.,4,.../ !FR()] – значения границ (см) интервалов гистограммы радиальных распределений (max=101). Начинаются с 0 и возрастают до значения не менее, чем радиус всего поглотителя. Этот массив должен заканчиваться слешем (/).

17) [0 !NSTR] – признак вычисления интегральных и дифференциальных характеристик в поглотителе в определенной области по R. При NSTR = 0 от 0 до Rmax. Если NSTR= I < LR, то все результаты будут вычисляться в пределах первых I зон по R.

18) [1 !NPE] – признак вычисления дифференциальных характеристик электронов. 1- вычислять; 0- нет.

19) [1 !NPG] – признак вычисления дифференциальных характеристик фотонов 1 – вычислять; 0 – нет.

20) [1 !NPOZ] – признак вычисления дифференциальных характеристик позитронов. 1 – вычислять; 0 – нет.

21) [0 !NPROT] – признак вычисления дифференциальных характеристик протонов. 1 – вычислять; 0 – нет.

\*\*\*\*\* часть 3 (ДААННЫЕ ДЛЯ DRF)

22) [0 !RF] – признак считать (1), не считать (0) функцию чувствительности детектора (DRF).

*Если считается DRF (функция отклика/чувствительности детектора), то необходимо ввести несколько строчек данных. Подробно это рассматривается в 5-м примере (exampl\_5.de5).*

\*\*\*\*\* часть 4 (ДАННЫЕ ДЛЯ ВНЕШНЕГО Е и В ПОЛЯ)

23) [0 !PR\_FIELD] – признак наличия внешнего электрического и магнитного поля: 0 – поля нет; 1 – поле есть.

*Если в некоторых (или во всех) зонах имеется внешнее поле, то необходимо вводить дополнительную информацию. См. файл exampl\_2.de5, а также описание входных данных для режима BARRIER.*

\*\*\*\*\* часть 5 (ИСТОРИИ)

24) [9999999 !NISTM] – максимальное число историй (любое число).

25) [20000 !NIST\_PR] – число историй, после моделирования которых происходят периодические промежуточные выдачи результатов расчета в специальный файл (res\_prom.re5).

26) [1000 !NTR] – число историй, при расчете которых траектории частиц строятся на экране.

\*\*\*\*\* часть 6 (ЗАДЕРЖКА, ЦВЕТА ВЕЩЕСТВ)

27) [0 !ITZAD] – время задержки перед построением очередного элемента траектории частиц (мсек). 0 – нет задержки.

*Моделирование с построением траекторий частиц на экране (особенно с использованием задержки) выполняется намного медленнее, чем без построения.*

28) [3,7,6,19,0,14 !NCFIG] – номера цвета веществ, которыми рисуются их траектории на экране. Их количество должно быть не менее числа веществ, для которых рассчитан файл констант с расширением "fse" программой CONST (см. пункт 1). Цвета и их номера можно увидеть через раздел меню "Palette".

\*\*\*\*\* часть 7 (СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ)

29) [0.75 !DSMPER] – коэффициент, который позволяет уменьшать величину отрезка траектории электронов и позитронов при пересечении границы зоны. Это позволяет более точно рассчитывать характеристики поля излучения этих частиц вблизи границы раздела сред.  $0.25 \leq \text{DSMPER} \leq 1$ . Уменьшение DSMPER увеличивает время счета.

30) [1 !NEPG] – признак поглощения фотонов при  $E < E_{\text{min}}$  (0-нет, 1-да). Если 1, то оставшаяся энергия фотона добавляется к поглощенной энергии.

31) [1,0 !NIEK,NKMTD] – признак (NIEK) и метод (NKMTD) ионизации К-оболочки электронами (позитронами). NIEK = 0-нет, 1-да. NKMTD=0 – аналоговый метод расчета, 1 – аналитическое усреднение (НЕАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ).

32) [1,0 !NIEL,NLMTD] – то же для L-оболочки электронами (позитронами).

33) [0,0 !NIEK\_PR,NKMTD\_PR] – аналогично (30), но для протонов.

34) [0,0 !NIEL\_PR,NLMTD\_PR] – аналогично (31), но для протонов.

35) [0,1,.5,.1 !MDE,NMDE,EMDE,ZRM\_E] MDE – количество электронов (позитронов) при ветвлении (расщеплении) их траектории.  $MDE \geq 0$ . Если  $MDE=0$ , то расщепления нет.  $MDE > 0$  это НЕАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ. Увеличение MDE увеличивает время счета. NMDE – признак расщепления: 1 – только для электронов, которые движутся вперед, 2 – только назад, 3 – все. EMDE – минимальная энергия

(МэВ), до которой проводится расщепление.  $ZRM\_E$  – граница ветвления по  $Z$  (см) Ветвление происходит в области  $Z > ZRM\_E$ .

36) [0,1,.2,.5 !MDG,NMDG,EMDG,ZRM\_G] – аналогично для фотонов.

*Если первая цифра 0 (расщепления нет), то остальные цифры не учитываются. Если частица появилась в результате расщепления (или ее траектория расщеплялась), то больше в расщеплении она не участвует.*

37) [0 !NFOT] – признак аналитического усреднения фотоэффекта (поглощения фотона): 0 – нет, 1 – только для фотонов летящих вперед, 2 – только назад, 3 – для всех. Позволяет увеличить глубину проникновения для веществ, у которых велико сечение фотопоглощения.

38) [0,3,.5. !NTORM,ETORM,WR\_MAX] NTORM – признак увеличения выхода тормозного излучения (ТИ): 0 – нет, 1 – только для электронов (позитронов), движущихся вперед, 2 – только назад, 3 – для всех; ETORM – энергия (МэВ) электронов и позитронов, выше которой будет использоваться этот метод ( $ETORM < E$  источника); WR\_MAX – коэффициент увеличения сечения ТИ ( $1 < WR\_MAX \leq 10$ ).

39) [n !NANNIH] – признак учета аннигиляции на лету:  $n=0$  -аналоговое моделирование аннигиляции на лету;  $n=1$  – неаналоговое моделирование (аннигиляция происходит в каждой точке столкновения позитрона с соответствующим весом);  $n=2$  – отключение аннигиляции на лету.

40) [1.0d-25 !QGR] – Min вес частиц, до которого строятся их траектории.  $0 < QGR < 1$ . Заканчиваться траектория частицы может как по достижении минимальной энергии, ее вылета из барьера, так и по достижении минимального веса = QGR.

41) [0 !NZON] – число зон ( $max=200$ ), в которых применяется аналитическое усреднение поглощенной энергии фотонов (НЕАНАЛОГОВОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ФОТОНОВ). 0 – нет аналитического усреднения.

*Если  $NZON > 0$ , то далее должна следовать строка, в которой перечисляются номера зон, в которых есть аналитическое усреднение.*

42) [0 !NZVR] – число зон (слоев) по  $Z$ , в которых применяется вынужденное рассеяние фотонов для вычисления поглощенной энергии (НЕАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ).

*Если  $NZVR > 0$ , то далее следует строка с номерами зон. Вынужденное рассеяние применять только для барьеров с  $LR=1$  (см. (3)). НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ одновременно аналитическое усреднение и вынужденное рассеяние!*

43) [0,1,0.5d0 !NOAN,IZ\_NOAN,A\_NOAN] NOAN – признак: 0 – аналоговое моделирование свободного пробега фотонов, 1 – неаналоговое моделирование свободного пробега фотонов (НЕАНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ); IZ\_NOAN – номер зоны по  $Z$ , где метод используется; A\_NOAN – коэффициент изменения сечения  $0 < A\_NOAN \leq 0,9$ .

*Этот метод позволяет получить результат с меньшей статистической погрешностью и за меньшее время на большом удалении от источника фотонов. Например, рассчитать зависимость дозы за барьером от фотонов для больших толщин поглотителя.*

- ПРИМЕНЯТЬ ТОЛЬКО ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПО Z и R СЛОЯ БАРЬЕРА,
- НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ВМЕСТЕ С АНАЛИТИЧЕСКИМ УСРЕДНЕНИЕМ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ,
- НЕ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ВМЕСТЕ С ВЫНУЖДЕННЫМ РАССЕЯНИЕМ

=====

Единственный недостаток метода Монте-Карло – медленная сходимость, которая делает НЕ ЭФФЕКТИВНЫМ аналоговое (имитационное) моделирование для оценки событий, имеющих очень малую вероятность. Для этих целей применяют разнообразные способы НЕАНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ частиц и НЕАНАЛОГОВОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ВКЛАДОВ на построенных траекториях, использующие так называемые веса. Чтобы свободно задавать параметры пунктов 6-й части необходимо:

- представлять, что такое неаналоговое моделирование (см., например, И.М. Соболев "Метод Монте-Карло"/ Популярные лекции по математике, М.: Наука, 1985; И.М. Соболев "Численные методы Монте-Карло" – М.: Наука, 1973; А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин "Введение в теорию прохождения частиц через вещество" – М.: Атомиздат, 1978; А.М. Кольчужкин, А.В. Богданов "Метод Монте-Карло в теории переноса излучений": Учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2006; М.П. Панин "Моделирование переноса излучения": Учебное пособие – М.: МИФИ, 2008);
- экспериментировать и приобретать опыт.

=====

\*\*\*\*\* часть 8 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)

44) [ist ! nameist] Начало ввода характеристик источника. Структуру этих данных см. в меню "Sources".

#### **Файл exampl\_2.de5**

ЗАДАЧА: расчет потоковых интегральных и дифференциальных характеристик поля излучения в слое воздуха высотой 50 м. В этом слое находится радионуклид Cs-137, активность которого убывает с высотой.

#### **Файл exampl\_3.de5**

ЗАДАЧА: Барьер неоднородный по R и Z. Источник рентгеновского излучения кольцевой внутренней с  $U_{max} = 150$  кВ. Спектр источника задан гистограммой, угловое распределение – функцией. Использован ist3g.

#### **Файл exampl\_4.de5**

ЗАДАЧА: Расчет каскадных кривых электронов и фотонов в воздухе от первичного фотона с энергией 10000 МэВ.

#### **Файл exampl\_5.de5**

ЗАДАЧА: Расчет методом Монте Карло распределения импульсов поглощенной в детекторе NaI(Tl) энергии от гамма-излучения радионуклидного источника Cs-137+Ba137m->Ba-137. Диаметр кристалла NaI(Tl) 31 мм, толщина 19 мм, защитная оболочка из MgO и Al, вокруг всего детектора защита из Pb. На это реальное распределение импульсов накладывается аппаратный спектр

импульсов (DRF), который вычисляется по формуле с учетом полученного распределения. Формула получена на основе экспериментальных данных и учитывает уширение амплитуды импульса в каждом канале по нормальному закону и за висимость энергетического разрешения детектора от энергии канала.

===== входные данные exampl\_5.de5 =====

\*\*\*\*\* часть 1 (ГЕОМЕТРИЯ)

drf\_10.fce

TITLE: Расчет функции отклика дет-ра NaI(Tl). Плоский ист-к Cs-137.

7,6 ! LZ,LR

2.,2.,.1.,.3,1.9,3.,2. ! dZ

.5,1.05,.25,.2,2.,2. ! dR

6,6,10,8,1,10,15 15,6,10,8,1,10,15 15,6,10,8,8,10,15

15,6,10,10,10,10,15 15,6,6,6,6,6,15 15,15,15,15,15,15 ! NBZ

0 ! NBZ\_NO

\*\*\*\*\* часть 2 (ДАнные ДЛя ФУНКЦИОНАЛОВ)

0.,1.,2.,3.,4.,4.1,4.4,4.6,4.8,5.,5.2,5.4,5.6,5.8,6.,6.2,6.3,7.,

8.,9.,10.,11.,11.3/ ! ZRI()

4 ! NZRD

0.,4.4,6.3,11.3 ! ZRD

0,1,0 ! NPSLOI

1 ! NALB

132,0.01,0.005 !NFE\_A,Emin,dE

0.,5.,10.,15.,20.,25.,30.,35.,40.,45.,50.,60.,70.,80.,90.,100.,

110.,120.,130.,140.,150.,160.,170.,180./ ! FT()

.0.,1.,2.,3.,4.,5.,6.,7.,8.,9,1.,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.8,2.,

2.5,3.,3.5,4.,4.5,5.,5.5,6./ ! FR()

2 ! NSTR

1 ! NPE

1 ! NPG

0 ! NPOZ

0 ! NPROT

\*\*\*\* часть 3 (ДАнные ДЛя ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТ. (DRF))

1 !RF (0, 1)

2 !NZON\_RF

5 !ZONA

12 !ZONA

1 !NTIP\_DET ( NaI(Tl)1 )

0.d0,700,1.d0 !EMINKAN\_RF(keV),NKAN\_RF,DKAN\_RF(keV)

1 !NPHOT\_PIK

10.d0 !COMP\_INC

4 !NEBASE

12.217d0,72.804d0,87.361d0,661.657d0 !EBASE (keV)

\*\*\*\*\* часть 4 (ДАнные ДЛя ВНЕШНЕГО Е и В ПОЛя)

0 ! PR\_FIELD(Поля нет)

\*\*\*\*\* часть 5 (ИСТОРИИ)

100000000 ! NISTM  
500000 ! NIST\_PR  
1000 ! NTR

\*\*\*\*\* часть 6 (ЗАДЕРЖКА, ЦВЕТА ВЕЩЕСТВ)

0 ! ITZAD  
160,5,14,13,119,15,15,19,16,7,6,138,20,12,0,1,9\*15 ! NCFIG

\*\*\*\*\* часть 7 (СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ)

.75 ! DSMPER  
1 ! NEPG  
1,0 ! NIEK,NKMTD  
1,0 ! NIEL,NLMTD  
0,0 ! NIEK\_PR,NKMTD\_PR  
0,0 ! NIEL\_PR,NLMTD\_PR  
0,1,.5,.1 ! MDE,NMDE,EMDE,ZRM\_E  
0,1,.2,.5 ! MDG,NMDG,EMDG,ZRM\_G  
0 ! NFOT  
0,3,.5. ! NTORM,ETORM,WR\_MAX  
0 ! NANNIH  
1.d-25 ! QGR  
0 ! NZON  
0 ! NZVR  
0,1,0.5d0 ! NOAN,IZ\_NOAN,A\_NOAN

\*\*\*\*\* часть 8 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)

ist\_rad ! nameist

===== описание exampl\_5.de5 =====

Рассмотрим лишь данные для расчета DRF, все остальное как в 1-м примере.

\*\*\*\*\* часть 1 ГЕОМЕТРИЯ

\*\*\*\*\* часть 2 (ДАнные ДЛя ФУНКЦИОНАЛОВ)

\*\*\*\*\* часть 3 (ДАнные ДЛя DRF)

22) [1 !RF] – признак считать (1), не считать (0) функцию чувствительности детектора (DRF). Здесь считать.

23) [2 !NZON\_RF] – число рабочих зон детектора, где вычисляется DRF. Здесь 2 зоны. Это зоны при разбиении всей геометрии по Z и R.

24) [5 !ZONA] – 5-я зона.

25) [12 !ZONA] – 12-я зона.

*Вещество NaI(Tl) находится в 5 и 12 зонах.*

26) [1 !NTIP\_DET] – номер типа детектора, формула для которого используется для расчета DRF. 1 – это NaI(Tl)1; 2 – NaI(Tl)2; 3 – Ge1; 4 – Ge2.

=====

1 – формула энергетического разрешения детектора (R) из работы: A. Cengiz An approximation for response function to gamma-rays of NaI(Tl) detectors. Appl. Rad. and Isotopes 66(2008)1371-1376.

$$f(E) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E-\bar{E})^2}{2\sigma^2}\right),$$

$$\sigma = \frac{\Delta E}{2\sqrt{2\ln 2}},$$

$\Delta E$  – полуширина (ширина на половине высоты),  $\Delta E = \text{FWHM}$  – Full Width at Half Maximum.

Энергетическое разрешение детектора

$$R = \frac{\Delta E}{E},$$

тогда:

$$\sigma = \frac{R \cdot E}{2\sqrt{2\ln 2}}.$$

Для 1

$$R = c_1 + c_2 E^{c_3} + c_4 E^{c_5},$$

где  $c_1 = 0.022735$ ;  $c_2 = 0.072795$ ;  $c_3 = -0.29359$ ;  $c_4 = -0.024069$ ;  $c_5 = 0.20504$ .  $E$  в МэВ.

Для 2 – аппроксимация экспериментальных данных для R спектрометра лаб. ЭМЯФ каф. ПФ ФТИ ТПУ (кристалл NaI(Tl) 3"×3")

$$R = E^{-0.38603} \cdot \exp(-0.15307),$$

где  $E$  в кэВ.

Для 3 – формула для R из работы: E.E. Zadeh et. al. Gaussian Energy Broadening Function of an HPGe Detector in the range of 40keV to 1.46MeV. J. of Experimental Physics. Vol. 2014, Article ID 623683, 4 pages.

$$R = \frac{a + b\sqrt{E + cE^2}}{E},$$

где  $a = 5.86828 \cdot 10^{-4}$  MeV;  $b = 3.95113 \cdot 10^{-4}$  MeV<sup>1/2</sup>;  $c = 7.46793$  MeV<sup>-1</sup>.

Для 4 – формула для R спектрометра лаб. ЭМЯФ каф. ПФ ФТИ ТПУ (кристалл Ge)

$$R = \frac{0.4219 + 0.03472\sqrt{E}}{E},$$

где  $E$  в кэВ.

27) [0.d0,700,1.d0 !EMINKAN\_RF,NKAN\_RF,DKAN\_RF]EMINKAN\_RF – MIN энергия каналов (кэВ), NKAN\_RF – число каналов (max=1000 определяется max числом пикселей по оси X на рисунке), DKAN\_RF – ширина канала (кэВ).

28) [1 !NPHOT\_PIK] – число фотопиков, например, 1 у <sup>137</sup>Cs; 2 у <sup>60</sup>Co (только 0, 1 или 2). Используется для определения эффективности детектора по фотопику. Если 0, то это значение не рассчитывается.

29) [10.d0 !COMP\_INC] – коэффициент увеличения комптоновского распределения. Во столько раз уменьшается max оси Y, чтобы увеличить высоту комптоновского распределения на фоне фотопиков. Используется только при линейной шкале по оси Y.

30) [4 !NEBASE] – число базовых энергий (MAX=20), которые указываются на рисунке амплитудного распределения импульсов. Это известные энергии, например, гамма-излучения или ХРИ.

31) [12.217d0,72.804d0,87.361d0,661.657d0 !EBASE] – базовые энергии (keV).

Здесь это линии гамма-излучения Pb, слой которого окружает детектор.

\*\*\*\*\* часть 4 (ДААННЫЕ ДЛЯ ВНЕШНЕГО E и B ПОЛЯ)

\*\*\*\*\* часть 5 (ИСТОРИИ)

\*\*\*\*\* часть 6 (ЗАДЕРЖКА, ЦВЕТА ВЕЩЕСТВ)

\*\*\*\*\* часть 7 (СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ)

\*\*\*\*\* часть 8 (ИСТОЧНИК ЗАДАЧИ)

---

---

### Файл exampl\_6.de5

ЗАДАЧА: Расчет функции отклика детектора NaI(Tl) 50\*50мм. Гамма-излучение точечного изотропного р/н  $^{137}\text{Cs}$  падает на барьер из Pb и затем попадает в детектор. DRF рассчитывается в интервале 50–100кэВ.

---

---

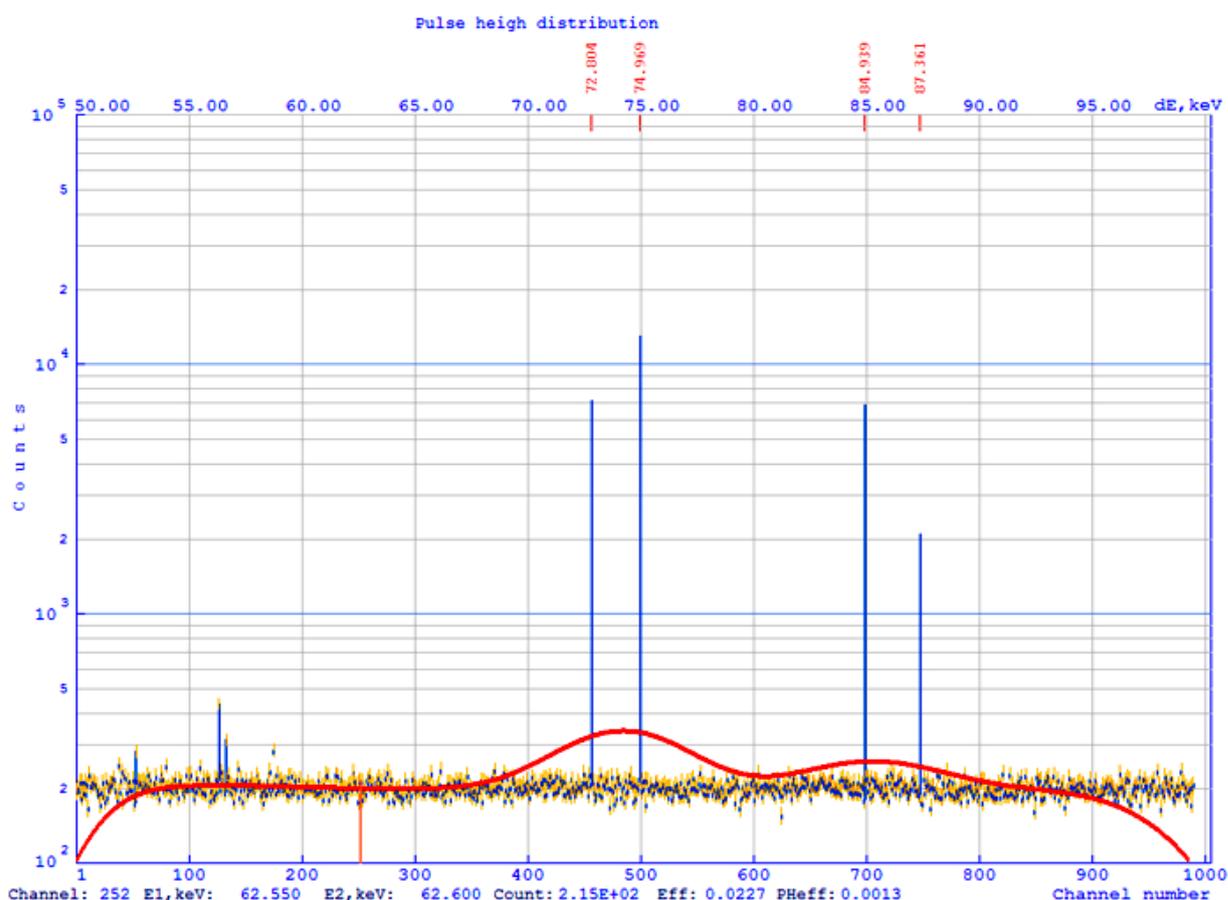


Рис. 3.9.1. Распределение импульсов и DRF в NaI(Tl) от гамма-излучения, выходящего из Pb

### Файл exampl\_7.de5

ЗАДАЧА: Расчет функции отклика Ge детектора 50\*50мм. Гамма-излучение точечного изотропного р/н  $^{137}\text{Cs}$  падает на барьер из Pb и затем по падает в детектор. DRF рассчитывается в интервале 50–100кэВ.

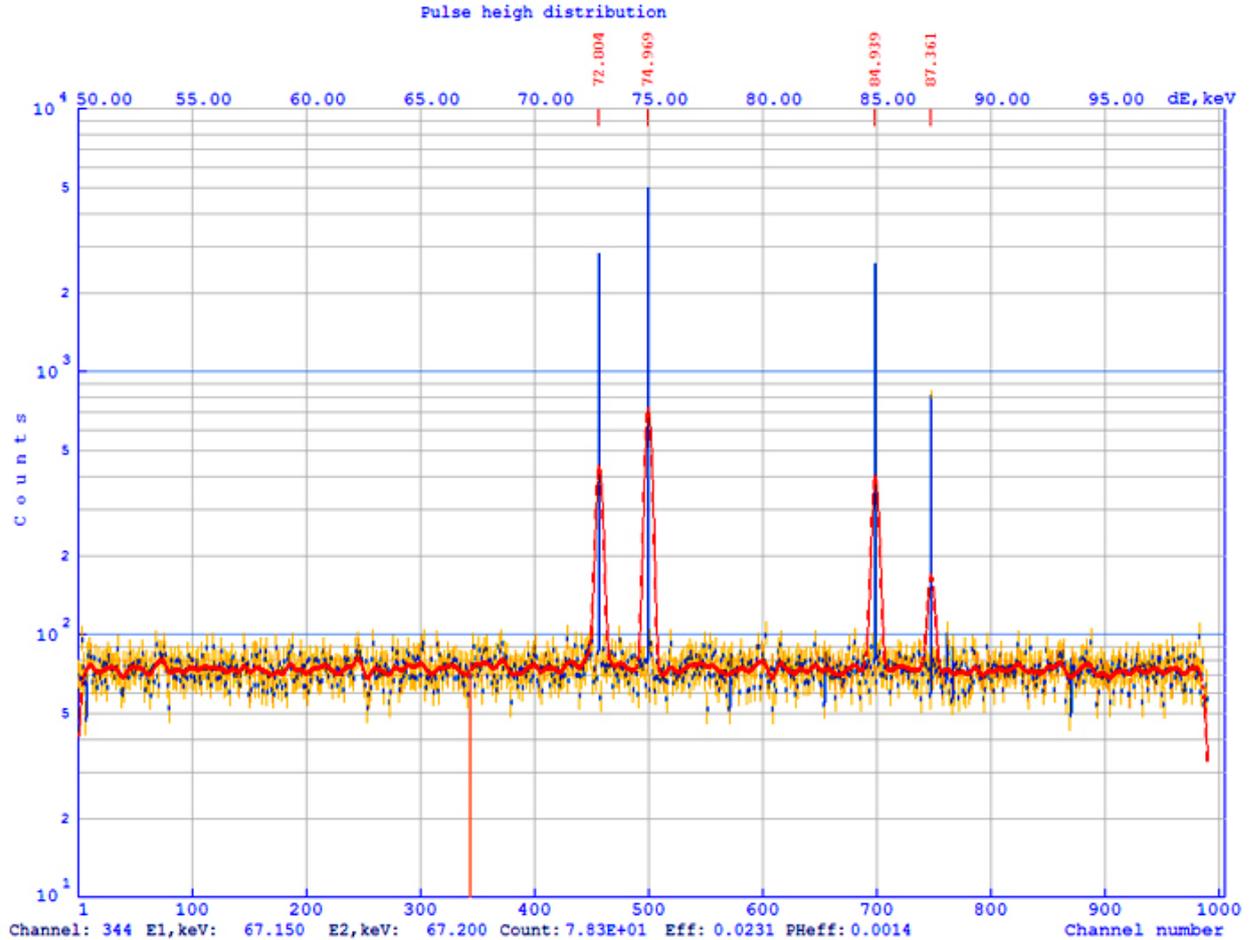


Рис. 3.9.2. Распределение импульсов и DRF в Ge от гамма-излучения, выходящего из Рб

На рис. 3.9.1 и 3.9.2 пики в распределении импульсов соответствуют ХРИ свинца:  $K_{\alpha 1}$ ,  $K_{\alpha 2}$ ,  $K_{\beta 1}$  и  $K_{\beta 2}$ .

#### Файл exampl\_8.de5

ЗАДАЧА: Расчет функции отклика детектора NaI(Tl) 3"\*3" для гамма-излучения точечного изотропного р/н  $^{106}\text{Ru}$  (много гамма-линий). Файл констант drf\_10.fce позволяет просто сменить тип детектора на Ge и увидеть разницу в энергетическом разрешении детекторов NaI(Tl) и Ge.

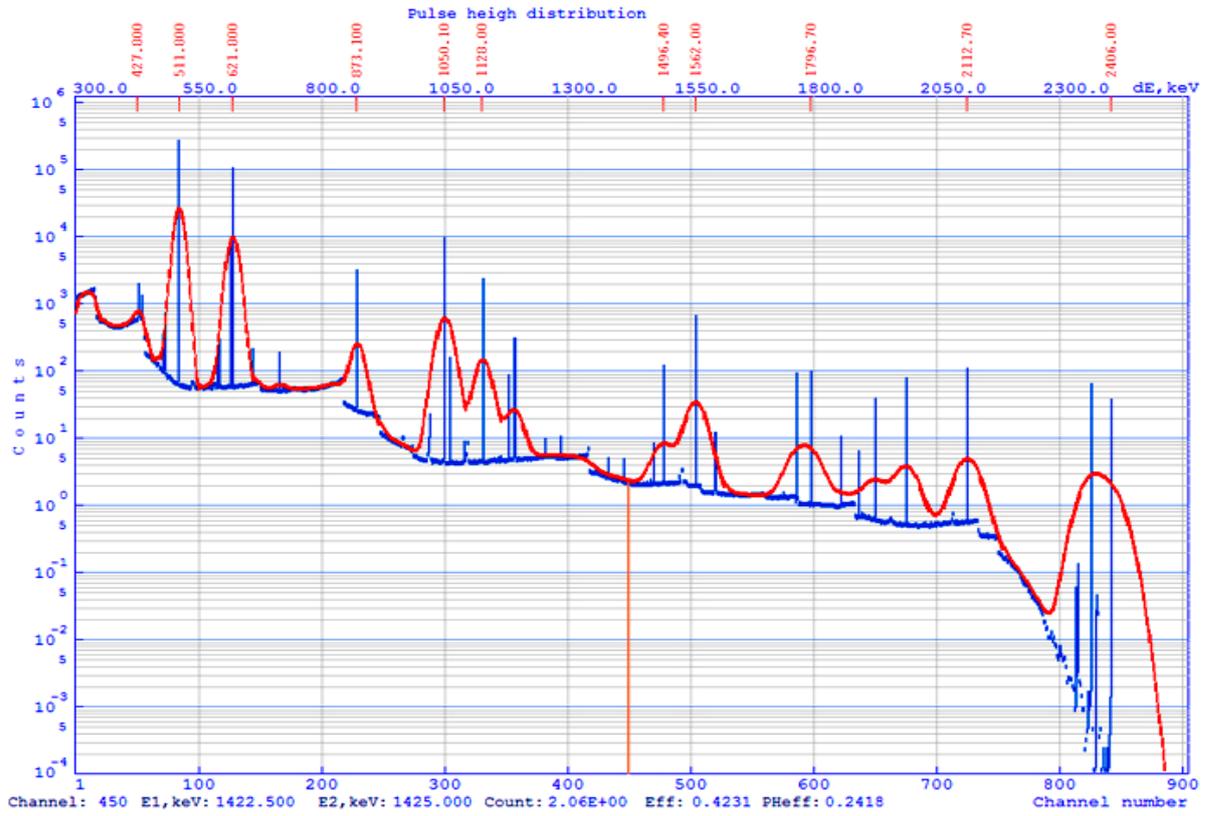


Рис. 3.9.3. Распределение импульсов и DRF в NaI(Tl) от гамма-излучения р/н  $^{106}\text{Ru}$

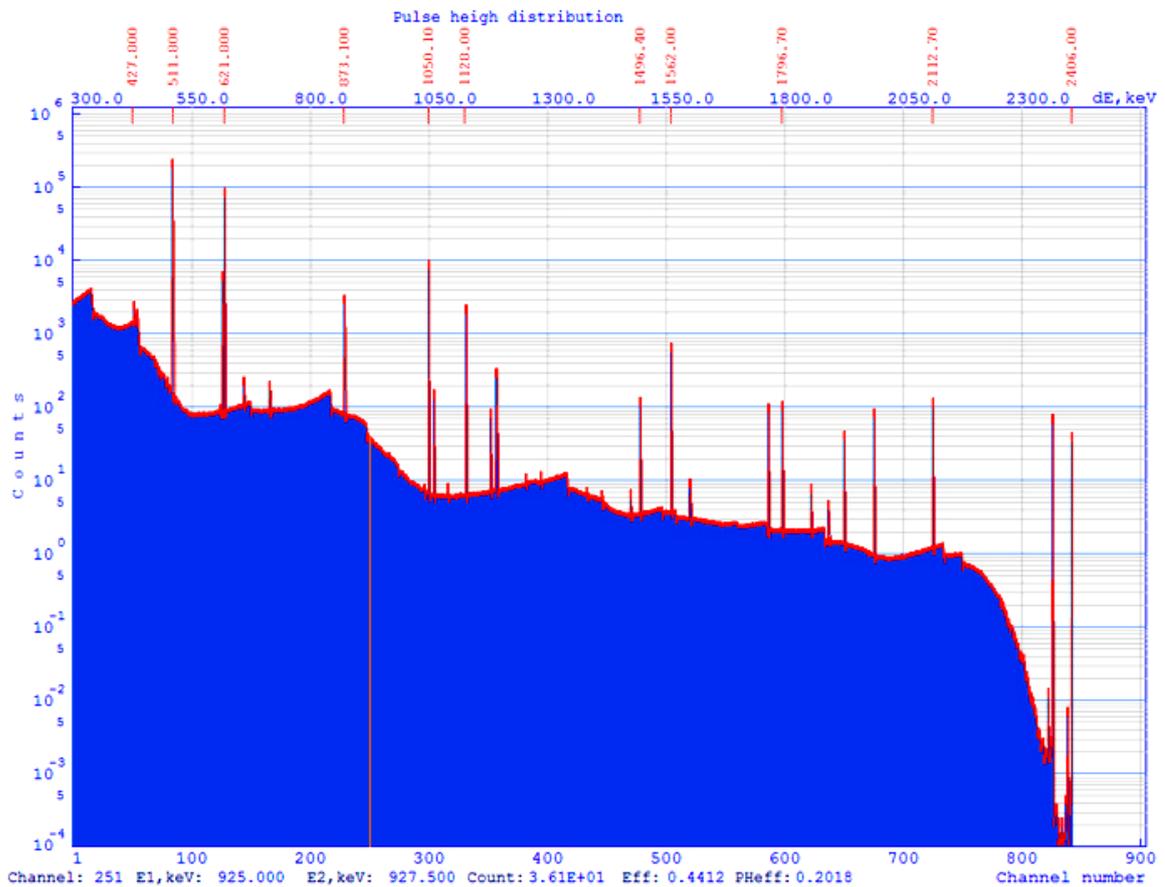


Рис. 3.9.4. Распределение импульсов и DRF в Ge от гамма-излучения р/н  $^{106}\text{Ru}$

#### **Файл exampl\_9.de5**

ЗАДАЧА: Расчет функции отклика детектора NaI(Tl) 3"\*3" для гамма-излучения точечного изотропного р/н Co-60. Две линии для эффективности по фотопику.

#### **Файл exampl\_10.de5**

ЗАДАЧА: Цилиндрический поглотитель (внутри воздух, стенки из Al), который является имитацией КА, облучается со всех сторон равномерным и изотропным источником электронов с космическим спектром РПЗ. Рассчитывается поглощенная энергия и доза внутри КА. Демонстрация работы с источником IST\_ISOCYL.

#### **Файл exampl\_11.de5**

ЗАДАЧА: Цилиндрический поглотитель (внутри воздух, стенки из Al), который является имитацией КА, облучается со всех сторон равномерным и изотропным источником протонов с дифференциальным спектром (пикового) потока. Рассчитывается поглощенная энергия и доза внутри КА. Демонстрация работы с источником IST\_ISOCYL.

#### **Файл exampl\_12.de5**

ЗАДАЧА: Цилиндрический поглотитель(внутри воздух, стенки из Al) облучается со всех сторон равномерным и изотропным источником рентгеновского излучения с  $U_{\max} = 250\text{кВ}$ . Рассчитывается поглощенная энергия и доза внутри цилиндра. Демонстрация работы с источником IST\_ISOCYL.

---

#### *Список литературы*

1. Беспалов В.И. **Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц** // Изв. вузов Физика, Приложение. – 2000. – № 4. – С. 159–165.
2. Беспалов В.И., Кольчужкин А.М. **Переходный эффект в ионизационном калориметре** // Изв. АН СССР, Серия Физическая. – 1981. – Т. 45. – № 7. – С. 1316–1318.

---

Е-mail автора: bvi@tpu.ru